

# POLITECNICO DI TORINO

## CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA ENERGETICA E NUCLEARE LM-30



**Politecnico  
di Torino**

**“Il controllo climatico attivo/passivo delle teche museali”**

**Relatore**

Prof. Marco Perino

**Candidato**

Pietro Lucio Malvasi

**Correlatore**

Prof. Vincenzo Maria Gentile

## **Abstract**

### ***Versione italiana***

La tesi affronta in modo integrato lo studio del controllo climatico attivo-passivo delle teche museali, con l'obiettivo di garantire condizioni termo-igrometriche idonee alla conservazione dei beni culturali riducendo al contempo i consumi energetici. Dopo l'inquadramento delle leggi fisiche che governano scambi termici e trasporto di vapore in volumi ridotti e del quadro normativo (UNI EN 10829, UNI EN 15757, DM 10/05/2001, Bizot Green Protocol), viene analizzato lo stato dell'arte delle soluzioni di controllo di frontiera, passivo e attivo, nonché dei dispositivi commerciali oggi disponibili per la climatizzazione delle vetrine.

Sul piano applicativo è stato sviluppato un modello numerico della teca di laboratorio (BET) mediante SketchUp e OpenStudio, includendo carichi per trasmissione, illuminazione e infiltrazioni; il modello è stato calibrato attraverso prove di tenuta con traccianti gassosi e campagne di misura in camera climatica, mostrando una buona aderenza tra andamenti simulati e misurati di temperatura e umidità relativa. È stata poi condotta una serie di test sperimentali per valutare l'influenza dei materiali presenti e delle condizioni esterne sul microclima interno, mettendo in evidenza il ruolo dei materiali igroscopici della teca nel modulare le fluttuazioni di umidità.

La tesi propone quindi la progettazione e realizzazione di un nuovo materiale tampone a base di composto argilloso (bentonite e alginato) per il controllo passivo dell'umidità: dopo la preparazione e il pre-condizionamento dei pannelli, sono state determinate le curve di adsorbimento, la capacità di assorbimento specifico secondo il CCI Technical Bulletin 33 e la derivata dell'assorbimento in funzione dell'UR, confrontando il materiale sviluppato con altri buffer (argille, geopolimero, silica gel). Sulla base di questi dati sono state stimate, tramite analisi multivariata, le masse di materiale tampone necessarie per mantenere l'umidità in bande prefissate per diversi tassi di ricambio e durate, sia per la teca di laboratorio sia per una teca ideale ad alta tenuta, e verificata sperimentalmente l'efficacia dei pannelli in un test di lunga durata in camera climatica.

Infine, il lavoro estende l'analisi al controllo attivo simulando tre casi studio (teca del Politecnico, teca "Alien" e teca "Gremlins" del Museo del Cinema) con OpenStudio, a partire da modelli geometrici 3D, carichi stimati e dati climatici reali interni al museo. Definiti set-point stretti (22,5–23,5 °C, 45–55%UR), sono state calcolate le potenze frigorifere di progetto e valutato il disaccoppiamento tra microclima della teca e condizioni del macroambiente, mostrando come potenze modeste consentano di mantenere il microclima entro i range desiderati e confermando la validità della climatizzazione dedicata delle teche, soprattutto se combinata con un opportuno buffering igroscopico passivo.

### ***English version***

The thesis comprehensively addresses the active-passive climate control of museum display cases, aiming to ensure suitable thermo-hygrometric conditions for the preservation of cultural heritage while minimizing energy consumption. Following the framing of the physical laws governing thermal exchanges and water vapor transport in small volumes, and the regulatory framework (UNI EN 10829, UNI EN 15757, DM 10/05/2001, Bizot Green Protocol), the state-of-the-art of frontier, passive, and active control solutions, as well as commercially available devices for display case climatization, is analyzed.

On the applied side, a numerical model of the laboratory display case (BET) was developed using SketchUp and OpenStudio, incorporating loads from transmission, lighting, and infiltrations; the model was calibrated through airtightness tests with gaseous tracers and measurement campaigns in a climatic chamber, showing good agreement between simulated and measured temperature and relative humidity trends. A series of experimental tests was then conducted to evaluate the influence of internal materials and external conditions on the microclimate, highlighting the role of hygroscopic materials in modulating humidity fluctuations.

The thesis proposes the design and production of a novel buffer material based on a clay compound (bentonite and alginate) for passive humidity control: after preparing and pre-conditioning the panels, adsorption isotherms, specific absorption capacity per CCI Technical Bulletin 33, and the derivative of absorption as a function of RH were determined, comparing the developed material with other buffers (clays, geopolymer, silica gel). Based on these data,

multivariate analysis estimated the masses of buffer material needed to maintain humidity within predefined bands for various air change rates and durations, both for the laboratory case and an ideal high-tightness case, with effectiveness verified experimentally in a long-duration climatic chamber test.

Finally, the study extends to active control by simulating three case studies (Politecnico case, “Alien” and “Gremlins” cases at the Cinema Museum) using OpenStudio, starting from 3D geometric models, estimated loads, and real museum internal climate data. With tight set-points (22.5–23.5 °C, 45–55%RH), design cooling powers were calculated and the decoupling between case microclimate and macroenvironment conditions was assessed, demonstrating that modest powers suffice to maintain the desired microclimate and confirming the viability of dedicated display case climatization, especially when combined with appropriate passive hygroscopic buffering.

# Indice

<b>1.INTRODUZIONE</b> .....	<b>1</b>
1.1 LEGGI FISICHE CHE REGOLANO IL MICROCLIMA DELLA TECA .....	1
1.2 NORME CHE REGOLANO LA CONSERVAZIONE DEI REPERTI ALL'INTERNO DELLE TECHE .....	5
1.2.1 UNI EN 10829:1999.....	6
1.2.2 UNI EN 15757:2010.....	7
1.2.3 DM 10/05/2001 .....	8
1.2.4 The Bizot green protocol.....	8
<b>2.STATO DELL'ARTE</b> .....	<b>10</b>
2.1 SOLUZIONI POSSIBILI .....	10
2.1.1 <i>Controllo di frontiera</i> .....	10
2.1.2 <i>Controllo passivo</i> .....	11
2.1.3 <i>Controllo attivo</i> .....	12
2.2 SOLUZIONI TECNOLOGICHE ADOTTATE .....	13
2.3 SOLUZIONI TECNOLOGICHE DISPONIBILI SUL MERCATO .....	14
2.4 CONFRONTO TRA LE VARIE SOLUZIONI DISPONIBILI .....	18
<b>3. CASO STUDIO</b> .....	<b>22</b>
3.1 COSTRUZIONE DEL MODELLO .....	24
3.1.1 <i>Definizione delle caratteristiche termofisiche dell'involucro</i> .....	25
3.1.2 <i>Definizione del carico di illuminazione</i> .....	26
3.1.3 <i>Definizione del carico per infiltrazioni</i> .....	27
.....	29
3.2 PROVA DI TENUTA .....	29
3.2.1 <i>Risultati ottenuti</i> .....	30
3.3 RISULTATI DELLA SIMULAZIONE .....	33
<b>4. TEST EFFETTUATI</b> .....	<b>38</b>
4.1 TEST 06/10/2025 .....	38
4.1.1 <i>Set up sperimentale</i> .....	38
4.1.2 <i>Risultati ottenuti</i> .....	39
4.2 TEST 04/11/2025 .....	43
4.2.1 <i>Set up sperimentale</i> .....	43
4.2.2 <i>Risultati ottenuti</i> .....	45
4.3 TEST DEL 18/11/2025.....	48
4.3.1 <i>Strumentazione utilizzata</i> .....	48
4.3.2 <i>Set-up sperimentale</i> .....	48
4.3.2 <i>Risultati ottenuti</i> .....	50
4.4 TEST DEL 19/11/2025.....	53
4.4.1 <i>Setup e strumentazione utilizzata</i> .....	53
4.4.2 <i>Risultati ottenuti</i> .....	54
<b>5. PROVA DI CONTROLLO PASSIVO DELL'UMIDITÀ DELLA TECA</b> .....	<b>57</b>
5.1 PREPARAZIONE DEL MATERIALE IGROSCOPICO .....	57
5.2 CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI IGROSCOPICI .....	60
5.2.1 <i>Calcolo della quantità di materiale tampone necessario per la teca</i> .....	63

5.2.2 Calcolo della quantità di materiale tampone per $N = 0.5$ 1/day.....	66
5.3 TEST DEL 13/01/2026.....	69
5.4 TEST DEL 17/02 E DEL 18/02/26.....	71
5.4.1 Risultati prove di decadimento.....	72
.....	73
5.4.2 Risultati test di controllo passivo dell'umidità relativa.....	73
<b>6. CONTROLLO ATTIVO: CASO STUDIO.....</b>	<b>77</b>
6.1 COSTRUZIONE DEI MODELLI.....	77
6.1.1 Definizione dei carichi termici delle teche .....	78
6.2 RISULTATI SIMULAZIONE .....	80
<b>7. CONCLUSIONI.....</b>	<b>84</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>86</b>

# Indice delle figure

Figura 1 - Confronto tra l'andamento dell'umidità relativa nella teca espositiva e nell'ambiente museale in presenza del solo controllo di frontiera .....	10
Figura 2-andamento UR per solo controllo passivo .....	12
Figura 3- andamento UR per solo controllo attivo.....	13
Figura 4-connessione tra vetrina e MiniOne .....	15
Figura 5-andamento temperatura durante il test .....	16
Figura 6-andamento UR durante il test .....	16
Figura 7- La Mona Lisa, Museo del Louvre.....	17
Figura 8-set up sperimentale per le misure della temperatura .....	22
Figura 9- andamento temperatura per le diverse termocoppie.....	23
Figura 10- modello 3D della teca .....	24
Figura 11-carico per illuminazione impostato su OpenStudio .....	27
Figura 12-analizzatore Bruel & Kjaer.....	28
Figura 13-Bruel & Kjaer 1302, utilizzato per il test.....	28
Figura 14-set up sperimentale per prova di tenuta .....	29
Figura 15-curva di best fit per la stima del tasso di ricambi orari per SF6 .....	32
Figura 16-curva di best fit per la stima del tasso di ricambi orari per CO2 .....	33
Figura 17-andamento temperatura esterna per il periodo della simulazione.....	34
Figura 18-andamento temperatura ottenuta dalla simulazione.....	34
Figura 19-andamento temperatura media interna della teca ottenuta con i dati misurati.....	35
Figura 20-confronto tra simulazione e dati misurati sperimentalmente .....	35
Figura 21-andamento scostamento assoluto.....	36
Figura 22-andamento scostamento relativo .....	36
Figura 23- scatter plot con linea di tendenza.....	37
Figura 24-set up sperimentale per il test a 0 gradi .....	38
Figura 25-Termometro TESTO .....	39
Figura 26-andamenti di temperatura misurati con il Testo e con le termocoppie confrontati con l'andamento di temperatura interna della BET .....	40
Figura 27-andamento di temperatura e umidità relativa della BET.....	40
Figura 28-andamento dell'umidità relativa misurata con il Testo confrontato con quello della BET.....	41
Figura 29- andamento di temperatura e umidità relativa ottenuti dalla simulazione .....	42
Figura 30- confronto tra i vari andamenti di temperatura.....	42
Figura 31-confronto tra i vari andamenti di UR ottenuti ed esterna.....	43
Figura 32-configurazione della teca per il test.....	44
Figura 33-andamento delle condizioni interne alla BET .....	45
Figura 34-confronto tra gli andamenti di temperatura esterna ed interna alla teca .....	46
Figura 35-confronto tra gli andamenti di umidità relativa della BET e interna alla teca .....	46
Figura 36-confronto tra gli andamenti di pressione di vapore interni alla BET e interni alla teca.....	47
Figura 37-sensori TEBE II e TEBE V .....	48
Figura 38-andamento temperatura e umidità indoor .....	49
Figura 39-andamento temperatura e umidità outdoor .....	50
Figura 40-andamento temperatura e umidità testo 3.....	50
Figura 41-andamento temperatura e umidità testo 4 .....	51
Figura 42- andamento temperatura e umidità relativa TEBE II .....	51
Figura 43-andamento temperatura e umidità relativa TEBE III .....	52
Figura 44-andamenti temperatura e umidità relativa TEBE V.....	52
Figura 45-andamento di temperatura e umidità relativa BET indoor.....	54

Figura 46-andamento temperatura e umidità relativa BET outdoor .....	54
Figura 47-andamenti temperatura dei vari sensori .....	55
Figura 48-andamenti umidità relativa dei vari sensori.....	55
Figura 49- andamenti delle pressioni di vapore dei vari sensori.....	56
Figura 50-composto dopo aver creato l'impasto .....	58
Figura 51-composto mentre viene raffinato con la raffinatrice.....	58
Figura 52- pannello post stampa.....	59
Figura 53- andamento delle masse dei pannelli durante l'essiccazione.....	60
Figura 54-curve di adsorbimento dei diversi materiali tampone .....	61
Figura 55- andamento della derivata per i diversi materiali tampone .....	62
Figura 56-andamento quantità di geopolimero richiesto per le diverse condizioni di D e di t nella teca .....	64
Figura 57-andamento quantità di argilla/alg richiesto per le diverse condizioni di D e di t per la teca .....	64
Figura 58-andamento quantità di argilla20Ca(OH) richiesto per le diverse condizioni di D e di t per la teca.....	65
Figura 59-andamento quantità di argilla non cotta richiesto per le diverse condizioni di D e di t per la teca.....	65
Figura 60-andamento quantità di argilla cotta richiesto per le diverse condizioni di D e di t per la teca .....	65
Figura 61-andamento quantità di silica gel richiesto per le diverse condizioni di D e di t per la teca .....	66
Figura 62-andamento quantità di geopolimero richiesto per le diverse condizioni di D e di t per N=0.5 1/day.....	67
Figura 63-andamento quantità di argilla/alg richiesto per le diverse condizioni di D e di t per N=0.5 1/day .....	67
Figura 64-andamento quantità di argilla20%Ca(OH) richiesto per le diverse condizioni di D e di t per N=0.5 1/day .....	67
Figura 65-andamento quantità di argilla non cotta richiesto per le diverse condizioni di D e di t per N=0.5 1/day .....	68
Figura 66-andamento quantità di argilla cotta richiesto per le diverse condizioni di D e di t per N=0.5 1/day .....	68
Figura 67-andamento quantità di silica gel richiesto per le diverse condizioni di D e di t per N=0.5 1/day.....	68
Figura 68-andamento di temperatura e umidità relativa esterna .....	69
Figura 69-andamento di temperatura e umidità relativa interna .....	70
Figura 70-andamento della massa del pannello durante il test .....	70
Figura 71- andamento delle condizioni esterne nei due giorni di test .....	71
Figura 72- teca preparata per l'ultimo test .....	72
Figura 73-andamento concentrazione SF <sub>6</sub> interno alla teca test 17/02 .....	72
Figura 74-andamento concentrazione SF <sub>6</sub> interna alla teca test 18/02.....	73
Figura 75- andamento di temperatura e umidità relativa interne alla teca test 17/02 .....	73
Figura 76- andamento di temperatura e umidità relativa interne test 18/02.....	74
Figura 77-andamento della massa e della variazione di massa di Artsorb durante il test .....	74
Figura 78- andamento di massa e variazione della massa del pannello durante il test.....	75
Figura 79-andamento di temperatura e umidità relativa interni al museo del cinema .....	79
Figura 81-confronto tra condizioni interne ed esterne Alien .....	81
Figura 80-andamento carico frigorifero Alien per il periodo di simulazione .....	81
Figura 82-andamento carico frigorifero teca del laboratorio .....	82
Figura 83-andamento condizioni interne ed esterne Gremlins .....	82
Figura 84-andamento carico frigorifero Gremlins .....	82
Figura 85-confronto tra condizioni interne ed esterne teca del laboratorio.....	83

# 1.Introduzione

Le vetrine espositive negli ultimi anni sono state sempre più utilizzate per la conservazione dei reperti artistici e storici all'interno dei musei. Queste presentano numerosi vantaggi quali:

- Sicurezza
- Controllo microclimatico
- Fruizione dell'opera.

La conservazione dei reperti all'interno di teche espositive consente di proteggere le opere da contaminazioni esterne, quali ad esempio la polvere, di mitigare i danni potenzialmente causati da eventi accidentali, come un ipotetico incendio, e di ridurre il rischio di atti vandalici.

Per quanto concerne il controllo microclimatico, come verrà illustrato nelle sezioni successive, assicurare che le opere siano conservate a condizioni termo-igrometriche adeguate consente di ottimizzare la conservazione dei reperti e di rallentare i processi di deterioramento dell'opera.

L'obiettivo primario della vetrina, in termini di fruizione dell'opera, è quello di garantire una visione il più chiara e fedele possibile. Ciò implica la selezione di materiali altamente trasparenti, in grado di non alterare la percezione cromatica dell'opera, nonché l'implementazione di sistemi di illuminazione adeguati, capaci di fornire un livello di illuminamento ottimale e di garantire un'illuminazione corretta e uniforme all'interno della teca.

L'obiettivo primario di questa tesi è l'analisi dell'efficacia di un sistema di controllo microclimatico attivo nel miglioramento delle condizioni termo-igrometriche interne, al fine di favorire la conservazione del bene artistico. Prima di procedere all'esame delle tecnologie e delle strategie attualmente implementate, è imprescindibile individuare le principali variabili termofisiche che richiedono un controllo accurato per garantire condizioni ambientali ottimali.

## 1.1 Leggi fisiche che regolano il microclima della teca

Inizialmente, è fondamentale sottolineare che le principali caratteristiche del problema del controllo microclimatico all'interno delle vetrine espositive sono la temperatura e l'umidità relativa all'interno della stessa. I range microclimatici possibili sono molteplici e dipendono

dai materiali contenuti all'interno della vetrina. Questo aspetto sarà ulteriormente approfondito in seguito, con particolare riferimento ai valori ottimali di umidità relativa e temperatura, come specificato nella norma UNI EN 10829, riportati nella Tabella 1. Inoltre, è importante evidenziare che, in molti casi, l'unica grandezza monitorata è l'umidità relativa, in quanto essa risulta avere un impatto preponderante sul mantenimento delle opere d'arte.

Per capire al meglio come si comporta il microambiente si possono osservare le varie leggi fisiche che regolano le condizioni microclimatiche interne.

Si può partire definendo l'umidità relativa. [5]

$$UR_i = \frac{p_{atm} * x_i}{(x_i + 0,622) * p_{ws}(T_i)} \quad (1)$$

Dove:

- $p_{atm}$  è la pressione atmosferica;
- $x_i$  è il titolo;
- $p_{ws}$  è la pressione di saturazione alla temperatura  $T_i$ .

Dall'analisi dell'equazione (1) emerge chiaramente che temperatura e umidità relativa non presentano una relazione di indipendenza. Di conseguenza, l'influenza della temperatura sul controllo microclimatico riveste un'importanza cruciale e non deve essere trascurata.

Un'altra grandezza molto importante è proprio la variazione di umidità relativa, in quanto anche questa risulta essere uno dei criteri da considerare per la salvaguardia delle opere artistiche.

Per questo motivo si può definire la seguente equazione [5]:

$$\dot{m}_{w_{in}} - \dot{m}_{w_{out}} + \dot{m}_{w,d} = \frac{\partial M_w}{\partial \tau} = \rho_a * V * \frac{\partial x_i}{\partial \tau} \quad (2)$$

Dove:

- $\dot{m}_{w_{in}} - \dot{m}_{w_{out}}$  sono le portate in massa dovute alla convezione;
- $\dot{m}_{w,d}$  è la portata in massa dovuta alla diffusione;
- $\rho_a$  è la densità dell'aria

- $V$  è il volume della vetrina
- $\frac{\partial x_i}{\partial \tau}$  è proprio la variazione dell'umidità nel tempo.

Il termine  $\dot{m}_{w,d}$  rappresenta portata massica legata al fenomeno della diffusione, ovvero un processo fisico attraverso il quale le particelle (come molecole di gas o liquido) si muovono spontaneamente da una zona a maggiore concentrazione verso una a minore concentrazione, fino a raggiungere un equilibrio.

È un fenomeno regolato dal gradiente di concentrazione e descritto dalla legge di Fick [5]. Avviene senza bisogno di energia esterna ed è responsabile, ad esempio, dello spostamento di umidità dal macroambiente verso il microambiente e viceversa.

Analizzando il fenomeno di diffusione del vapore acqueo nel caso specifico delle teche museali, è possibile descrivere il flusso diffusivo attraverso l'involucro mediante la seguente relazione [5]:

$$\dot{m}_{w,d} = \frac{A}{R_{eq}} * \rho_a * R_w^* * T * (x_0 - x_i) \quad (3)$$

Dove:

- $A$  è la superficie dell'involucro e, dunque della teca;
- $R_{eq}$  è la resistenza equivalente dell'involucro ai fenomeni diffusivi;
- $R_w^*$  è la costante elastica del vapor d'acqua.

Come si evince da (3) il flusso diffusivo di vapore dipende principalmente dalla differenza di contenuto di umidità tra l'ambiente esterno e quello interno alla teca. Considerando le proprietà dell'involucro e le costanti fisiche come parametri fissati, le variabili che influenzano maggiormente il fenomeno risultano essere la temperatura e la differenza di umidità tra i due ambienti.

Al fine di valutare i fenomeni convettivi che influenzano l'umidità relativa, è necessario considerare la dipendenza di questi fenomeni dalla permeabilità dell'involucro. Pur essendo le vetrine progettate per garantire un ambiente il più ermetico possibile, è innegabile che un

isolamento perfetto dall'ambiente esterno sia irrealizzabile. Pertanto, si può formulare la seguente equazione [5]:

$$\dot{m}_{win} - \dot{m}_{wout} = Q * \rho_a * (x_0 - x_i) \quad (4)$$

Dove Q rappresenta la portata volumetrica che passa attraverso l'involucro. In questo caso, la grandezza che influenza lo scambio, oltre alla differenza di titolo tra interno ed esterno della vetrina, è la portata d'aria attraverso l'involucro.

Come ultimo parametro, basandosi sulle metodologie utilizzate in fisica dell'edificio, è possibile definire il tasso di ricambi d'aria [5]:

$$n = \frac{Q}{V} \quad (5)$$

Mentre in ambito edile si considera il valore di ricambi orari (ACH), è buona norma nell'ambito delle vetrine espositive valutare il tasso di ricambi d'aria come giornaliero,  $n_d$ , proprio perché le teche sono molto più stagne di un edificio.

Dopo aver definito le varie grandezze l'equazione (2) può essere riscritta nella forma seguente:

Poiché le condizioni ambientali all'interno della teca e quelle dell'ambiente circostante devono spesso soddisfare requisiti differenti, una certa differenza tra i due ambienti risulta in alcuni casi inevitabile. Risulta pertanto opportuno analizzare le principali grandezze che contribuiscono alle variazioni di umidità all'interno della teca:

$$\frac{\partial x_i}{\partial \tau} = \left[ \frac{n_d}{3600 * 24} + \frac{A}{V} + \frac{1}{R_{eq}} * R_w^* * T \right] * (x_0 - x_i) \quad (6)$$

- $n_d$
- $A/V$
- $R_{eq}$

Analizzando tali parametri in relazione alle effettive possibilità di intervento, si può osservare che il rapporto tra superficie e volume della teca non rappresenta generalmente

un parametro modificabile. La teca, infatti, costituisce innanzitutto uno strumento espositivo che deve garantire un'adeguata visibilità dei beni artistici; di conseguenza, le sue dimensioni risultano nella maggior parte dei casi determinate da esigenze museografiche.

I parametri sui quali è invece possibile intervenire risultano principalmente il numero di ricambi d'aria giornalieri e la resistenza diffusiva dell'involucro della teca. Risulta pertanto opportuno adottare vetrine espositive caratterizzate da un numero di ricambi d'aria giornalieri sufficientemente ridotto e da un'elevata resistenza alla diffusione del vapore.

Una volta definite tutte le grandezze che influenzano il microclima della vetrina espositiva, è possibile proseguire con le varie strategie di controllo, che saranno approfondite nel capitolo 2.

## 1.2 Norme che regolano la conservazione dei reperti all'interno delle teche

Prima di analizzare le possibili strategie di controllo del microclima all'interno delle teche espositive, è opportuno esaminare il quadro normativo di riferimento, sia a livello nazionale sia internazionale, relativo alla regolazione delle variabili climatiche nelle vetrine museali. Sebbene le normative attualmente disponibili non forniscano indicazioni pienamente dettagliate sulle modalità di conservazione dei reperti – in particolare nel contesto italiano – esse definiscono comunque alcune linee guida utili per la gestione delle condizioni ambientali nei musei. Nel seguito vengono presentati i principali standard e documenti di riferimento utilizzati in ambito museale [21,23-25]:

- UNI EN 10829:1999: beni di interesse storico e artistico. Condizioni ambientali di conservazione. Misure ed analisi
- UNI EN 15757:2010: specifiche concernenti la temperatura e l'umidità relativa per limitare i danni meccanici causati dal clima ai materiali igroscopici
- DM 10/05/2001: Atto di indirizzo sui criteri tecnico- scientifici e sugli standard di funzionamento e sviluppo dei musei
- Linea guida Bizot: the Bizot green protocol

Nel seguito vengono analizzati i riferimenti normativi precedentemente elencati e le indicazioni che essi forniscono per la regolazione del microclima all'interno delle teche espositive.

## 1.2.1 UNI EN 10829:1999

La norma UNI EN 10829:1999[25], sebbene oggi formalmente ritirata, è ancora frequentemente utilizzata come riferimento per la conservazione dei reperti artistici all'interno dei musei. Essa definisce intervalli raccomandati di temperatura e umidità relativa entro i quali i componenti non dovrebbero subire danni meccanici dovuti alle variazioni microclimatiche all'interno della teca.

L'approccio adottato dalla norma si basa principalmente sulla tipologia di materiale costituente il manufatto e non considera le condizioni climatiche pregresse a cui il reperto è stato esposto. Per questo motivo la norma è stata successivamente superata dalla UNI EN 15757:2010, che introduce un approccio più dinamico basato sull'analisi del clima storico dell'ambiente di conservazione.

Nonostante ciò, la UNI EN 10829 continua ancora oggi a rappresentare uno dei principali riferimenti per la definizione degli intervalli termo-igrometrici nei contesti museali. Nella Tabella 1 sono riportati gli intervalli di temperatura e umidità relativa suggeriti dalla norma per diverse tipologie di materiali.

Tabella 1-condizioni ambientali consigliate per la conservazione dei beni artistici

CONDIZIONI AMBIENTALI CONSIGLIATE PER LA CONSERVAZIONE DEI BENI ARTISTICI						
	Temperatura	Massima escursione termica giornaliera	Massima escursione giornaliera dell'umidità relativa	Variazione MAX di umidità relativa	Illuminazione massima	Radiazione ultravioletta massima
	T	$\Delta T$	$\phi$	$\Delta \phi$	III	UV
	[°C]	[°C]	[%]	[%]	[lux]	[ $\mu V/m$ ]
<b>OGGETTI DI NATURA ORGANICA</b>						
Carta, cartapesta, lavori artistici in carta, veline, collezioni filateliche, tappezzeria in carta, stampe, papiri, manoscritti, materiali in cellulosa	18 - 22	1,5	18 - 22	6	50	75
Materiali in fibra naturale, tessuti, velari, tappezzerie in stoffa, tappeti, arazzi, abiti, costumi, seta, paramenti religiosi	19 - 24	1,5	30 - 50	6	50	75
Collezioni entomologiche	19 - 24	1,5	40 - 60	6	50	75
Animali, organi anatomici essiccati, mummie	21 - 23	1,5	20 - 35		50	75
Dipinti su tela, pitture a olio su canovaccio o tela, tempere, guazzi	19 - 24	1,5	40 - 55	6	150	75
Libri, preziosi, libri rilegati in pelle, pergamena, miniatura, rilegature in pelle	19 - 24	1,5	45 - 55	6	50	75
<b>OGGETTI DI NATURA INORGANICA</b>						
Mosaici di pietra, rocce, pietre, meteoriti non porose, minerali, fossili e collezioni di pietre	15 - 25		20 - 60	10	N.R.	
Gesso	21 - 23	1,5	45 - 55	150	150	75
Vetri instabili, iridescenti, sensibili, mosaici di vetro sensibile	20 - 24	1,5	40 - 55		150	75
<b>OGGETTI MISTI</b>						
Pittura murale, affreschi, sinopie staccate	10 - 24		55 - 65		N.R.	
Pitture murali a secco staccate	10 - 24	1,5	45 - 50		150	75
Avori, corna, collezioni malacologiche, uova, nidi, coralli	19 - 24	1,5	40 - 60	6	150	75
Dischi fonografici	10 - 21		40 - 55	2	150	
Fibre sintetiche	19 - 24		40 - 60		50	75
Film, fotografie a colori	0 - 15		30 - 45		50	75
Materie plastiche	19 - 24		30 - 50		< 300	75

La Tabella 1 riporta gli intervalli raccomandati di temperatura e umidità relativa previsti dalla norma UNI EN 10829:1999 per le diverse tipologie di materiali, insieme ai limiti di escursione giornaliera ammessi per tali.

### 1.2.2 UNI EN 15757:2010

Questa norma [24], più recente di quella vista in precedenza, cambia totalmente approccio rispetto al controllo microclimatico delle teche. In questo caso, non ci concentra più su range ben definiti di temperatura e umidità relativa dipendenti solo dal tipo di materiale, ma si basa sulla definizione di clima storico. L'obiettivo di questa norma, dunque, è quello di mantenere inalterato il microclima storico per oggetti organici conservati a lungo, preservando umidità relativa, cicli naturali e velocità di variazione, con modifiche accettabili solo per ridurre le fluttuazioni. È importante, pertanto, definire cos'è il clima storico presentato nella norma. Il clima interno è definito mediante livelli medi e variabilità di temperatura e umidità

relativa. Essi sono statisticamente rappresentati in termini di:

- livello medio su un periodo selezionato, per esempio un anno;
- cicli stagionali;
- fluttuazioni a breve termine.

La presente norma raccomanda di mantenere il clima storico, specialmente per quanto riguarda l'umidità relativa, se l'oggetto è stato ritenuto stabile. Si dovrebbero utilizzare i valori statistici (cioè livelli, intervalli, cicli e fluttuazioni) precedentemente citati per verificare se il clima ha subito modifiche e, in caso affermativo, in quale misura. Questi stessi valori dovrebbero essere utilizzati come obiettivi quando si pianificano sistemi di riscaldamento, ventilazione o condizionamento dell'aria (HVAC). Quando l'umidità relativa è stabile, non vi è necessità di modificare l'ambiente.

Se l'umidità relativa non è stabile, i limiti inferiore e superiore dell'intervallo obiettivo delle fluttuazioni di umidità relativa sono determinati rispettivamente come il 7° e il 93° percento delle fluttuazioni registrate nel periodo monitorato. Se le fluttuazioni seguono una distribuzione gaussiana, questi limiti corrispondono rispettivamente a -1,5 e +1,5, lo scarto tipo. Per tutte le distribuzioni, il 7 o il 93% sono ottenuti ordinando le fluttuazioni dal valore negativo minore al

valore positivo maggiore e selezionando i valori al di sotto dei quali si trovano rispettivamente il 7 o il 93 % delle osservazioni.

In questo modo si esclude il 14% delle fluttuazioni più ampie e rischiose, eliminando in modo eguale i picchi positivi e negativi di umidità relativa che producono ambienti eccessivamente umidi o secchi.

Tuttavia, se il procedimento precedente determina che le fluttuazioni di umidità relativa si scostano di meno del 10% dal livello di umidità relativa stagionale, il limite calcolato è considerato inutilmente rigido e può essere disatteso. Si può invece accettare la soglia di umidità relativa del 10%.

Sostanzialmente, dunque, il clima storico diventa un range di tipo statistico e non più dipendente solo dal tipo di materiale, andando a regolamentare solo le fluttuazioni.

### 1.2.3 DM 10/05/2001

Il decreto ministeriale del 10 maggio 2001[23] rappresenta l'unico documento normativo a livello nazionale che disciplina il controllo microclimatico delle teche. Pur essendo di ampia portata, focalizzandosi esclusivamente sul controllo microclimatico, si evince che il decreto non stabilisce regolamentazioni specifiche per le condizioni climatiche, bensì raccomanda il monitoraggio periodico di temperatura, umidità relativa e concentrazione degli inquinanti presenti all'interno della teca. In sostanza, il decreto non fornisce un'analisi quantitativa dei metodi più efficaci per la conservazione dei beni, limitandosi a raccomandare il controllo periodico del microclima delle teche.

### 1.2.4 The Bizot green protocol

Il protocollo verde di Bizot[21], ultima fonte esaminata per il controllo microclimatico delle teche, si propone di fornire linee guida per la conservazione delle opere d'arte, con un'attenzione particolare alla sostenibilità ambientale. Il protocollo sottolinea l'importanza di evitare sprechi energetici e evidenzia i vantaggi economici e ambientali derivanti dal climatizzare le teche separatamente dal museo che le ospita. Tuttavia, il protocollo non fornisce indicazioni specifiche sulle variabili microclimatiche interne alle teche, limitandosi a raccomandare la conservazione dei materiali organici a determinate condizioni. Pertanto, il

protocollo Bizot non contribuisce alla definizione delle condizioni microclimatiche ottimali per la salvaguardia delle opere museali.

## 2.Stato dell'arte

### 2.1 Soluzioni possibili

Attualmente le principali strategie adottate per il controllo microclimatico delle teche museali sono riconducibili a tre approcci principali:

- Controllo di frontiera
- Controllo passivo
- Controllo attivo

Nei paragrafi seguenti verranno analizzate le caratteristiche e le principali implicazioni di ciascuna di queste soluzioni.

#### 2.1.1 Controllo di frontiera

Il controllo di frontiera si prefigge di mitigare e sfasare nel tempo le sollecitazioni termiche e igrometriche, nonché di limitare la diffusione dei carichi inquinanti. Ciò si realizza mediante la chiusura ermetica delle teche, al fine di minimizzare la permeazione dell'aria all'interno delle stesse. L'utilizzo di teche ad alta tenuta all'aria consente di mantenere un microambiente stagno, il più possibile isolato dal macroambiente circostante. L'influenza del macroambiente sulla teca è illustrata nei dati sperimentali riportati nel seguente grafico. [5]

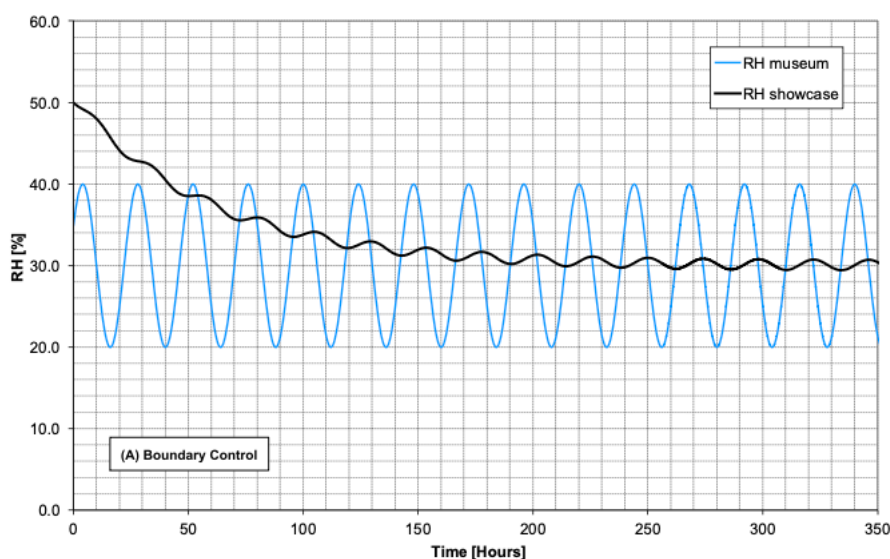


Figura 1 - Confronto tra l'andamento dell'umidità relativa nella teca espositiva e nell'ambiente museale in presenza del solo controllo di frontiera

Come illustrato nella Figura 1, il controllo di frontiera, pur essendo utile a posticipare e mitigare l'influenza delle condizioni esterne sul microambiente, non garantisce il mantenimento dell'umidità relativa all'interno della teca. Inoltre, il controllo di frontiera, in assenza di ulteriori misure, non consente di mantenere la temperatura all'interno della teca entro un range specifico, potenzialmente differente da quello del macroambiente.

Il controllo di frontiera, in ogni caso, rappresenta un metodo efficiente per evitare l'infiltrazione di inquinanti e umidità dall'ambiente esterno.

### 2.1.2 Controllo passivo

Il controllo passivo consiste nell'uso di materiali detti buffer (o tampone), per andare a rendere il sistema meno sensibile agli impulsi esterni, e, dunque, ad aumentare l'inerzia igrometrica dello stesso.

I materiali utilizzati per questo tipo di soluzione possono essere di diverso tipo, tra cui ad esempio materiali molto comuni come il legno e il cotone, fino a materiali più ricercati come la silice gel. Esistono, inoltre, materiali appositamente studiati per applicazioni museali come il ProSorb® e l'ArtSorb®.

L'utilizzo di questi materiali igroscopici, una volta trattati opportunamente, permette, come detto, di riportare l'umidità relativa ai valori desiderati. In sostanza, i materiali buffer assorbono l'umidità in eccesso e rilasciano vapor d'acqua se l'umidità relativa è troppo bassa per l'ambiente interno alla teca.

I materiali igroscopici risentono, inoltre, di un fenomeno detto isteresi, a causa della loro capillarità, ovvero, una volta assorbita una grande quantità di umidità, faticano ad essere svuotati velocemente. Anche per questo motivo, questi materiali devono essere sostituiti periodicamente.

L'andamento dell'umidità relativa gestito dal solo controllo passivo può essere visualizzato nel seguente grafico.

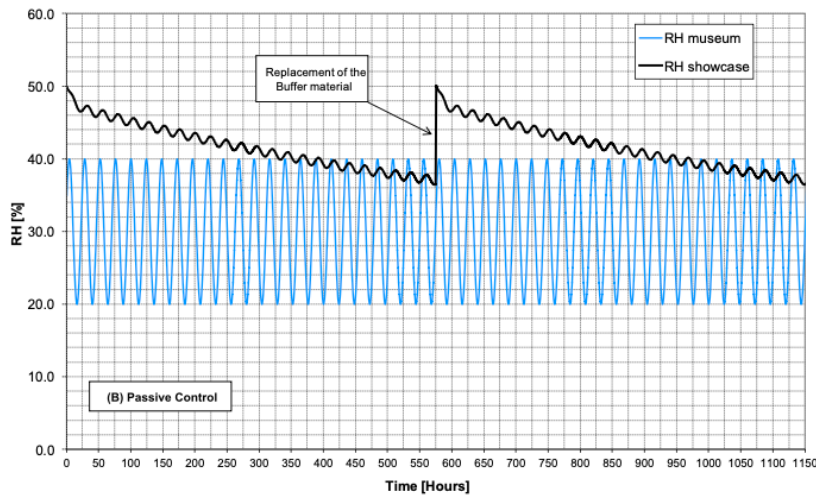


Figura 2-andamento UR per solo controllo passivo

Il grande svantaggio dei materiali tampone è che non permettono il controllo della temperatura. Dal punto di vista microclimatico sono comunque molto utili per ridurre le fluttuazioni dell'umidità relativa interna e possono essere utilizzati abbinandoli al controllo attivo. [5]

### 2.1.3 Controllo attivo

Il controllo attivo, a differenza degli altri due casi, permette di disaccoppiare completamente il microambiente dal macroambiente. Inoltre, questo tipo di controllo è l'unico tra quelli visti finora, che permette un controllo attivo anche della temperatura. Il controllo attivo prevede l'uso di un vero e proprio impianto di climatizzazione per il raggiungimento e, soprattutto, il mantenimento delle condizioni di set-point. Il grosso vantaggio di questa tipologia, è che le condizioni esterne alla teca non influiscono sulle condizioni interne.

Dal punto di vista teorico, il controllo attivo è il migliore per la salvaguardia delle opere all'interno della teca. Dal punto di vista pratico, avere dei componenti attivi include il rischio di avere grandi oscillazioni della temperatura e dell'umidità relativa a seguito di guasti di uno o più componenti del sistema.

Di seguito è possibile osservare l'andamento dell'umidità relativa all'interno di una teca per solo controllo attivo. [5]

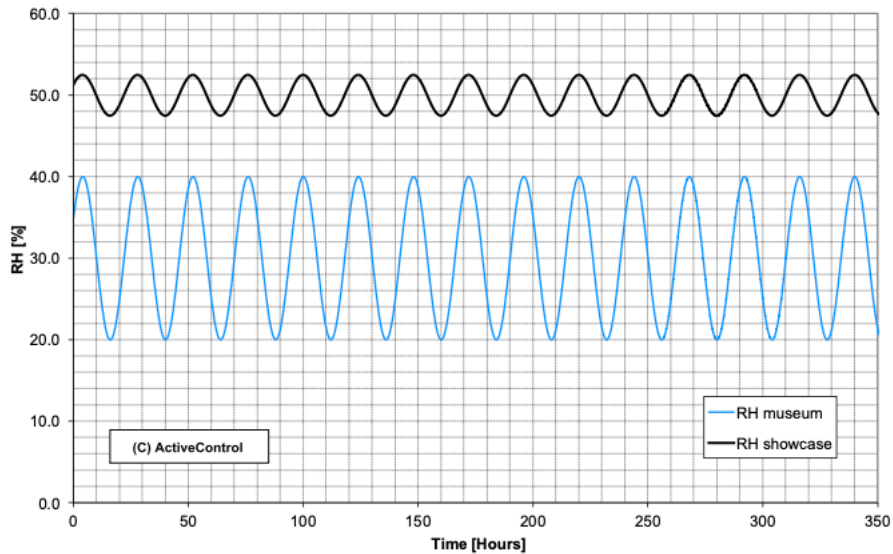


Figura 3- andamento UR per solo controllo attivo

## 2.2 Soluzioni tecnologiche adottate

Attualmente, sul suolo nazionale e non solo, le strategie di controllo e di salvaguardia dei reperti storici dal punto di vista climatico avviene prevalentemente condizionando l'intero ambiente in cui si trovano le opere. Il motivo di questa scelta deriva principalmente da due motivi:

- Semplicità di gestione: climatizzare l'intero ambiente è più semplice dal punto di vista del monitoraggio e del mantenimento dei set-point
- Costi di installazione: avere diversi impianti che vanno a climatizzare una o più opere richiede, ovviamente, un investimento maggiore rispetto alla climatizzazione del macroambiente (che dovrebbe essere comunque climatizzato per il comfort degli occupanti).

La scelta di climatizzare tutto l'ambiente presenta delle criticità legate a due aspetti:

- Opere che necessitano di condizioni diverse
- Costi operativi più elevati

Le opere molto spesso necessitano di essere conservate in condizioni molto diverse in base ai materiali di cui si compongono. Da questo si intuisce che, nel caso in cui in un ambiente vengano conservati manufatti di diversi materiali, il set-point che provveda alla salvaguardia

delle opere e al comfort degli occupanti non sia unico. Di seguito è possibile osservare le linee guida della norma UNI EN 10829:1999 per la conservazione dei diversi materiali.

Come è possibile osservare, mantenere diverse opere alle stesse condizioni non risulta ottimale per la loro conservazione.

Un altro aspetto importante da considerare risulta essere quello legato ai costi operativi. Climatizzare l'intero ambiente alle condizioni ottimali per le opere richiede un dispendio di energia maggiore, andando ad intaccare, inoltre, le condizioni di comfort degli occupanti.

Si stima che passando da un range di umidità relativa del  $50 \pm 2\%$  ad uno del  $50 \pm 10\%$  possa portare ad un risparmio del 40%. Partendo da queste considerazioni si può valutare che, anche se ancora poco diffuso, utilizzare una teca museale climatizzata porta con sé dei vantaggi sia economici che per la salvaguardia delle opere stesse.

## 2.3 Soluzioni tecnologiche disponibili sul mercato

Il problema legato alla climatizzazione delle teche museali è legato principalmente a due fattori:

- Scarso isolamento dall'esterno
- Ambienti da climatizzare molto piccoli

Le teche dei musei, dovendo comunque privilegiare la visione delle opere da parte dei visitatori, non consentono di avere un involucro sufficientemente isolato termicamente dall'ambiente esterno. I principali materiali utilizzati per le vetrine e la loro trasmittanza termica sono i seguenti illustrati in tabella.

Tabella 2-trasmittanze termiche per i vari di tipi di vetro

materiale	trasmittanza termica $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$
Vetro monolitico	5,5-6
Vetro stratificato	1,5
plexiglas	4-5
Polycarbonato compatto	3,5-4,5

Osservando questi dati è possibile concludere che, eccezion fatta per il vetro stratificato che ha una trasmittanza moderata, le vetrine espositive sono circondate da materiali decisamente poco isolanti termicamente. A questo si aggiunge la necessità di avere un carico aggiuntivo dovuto alle illuminazioni della teca stessa.

Il principale problema legato, invece, alla climatizzazione di un ambiente molto piccolo, come nella maggioranza dei casi, è legato soprattutto a ragioni commerciali. Sul mercato attuale trovare soluzioni adatte ai carichi termici ed igrometrici per microambienti di pochi metri cubi (a volte anche meno) non è di certo semplice. Per capire ancora meglio il bisogno di utilizzare dei sistemi di climatizzazione creati ad hoc per la singola vetrina espositiva (o per il gruppo di vetrine), si può provare ad evidenziare ancora una volta quale sarebbe il comportamento termo-igrometrico della teca su un caso sperimentale. In questo caso, come descritto in [26], è possibile osservare il funzionamento del generatore di umidità a ciclo attivo “miniOne” di Preservatech. In questo specifico caso, il controllo non è a livello della temperatura, ma solo sull’umidità relativa. I risultati ottenuti si riferiscono ad una vetrina di circa  $3,5m^3$ , in un giorno invernale, con un ricambio d’aria pari a 0,5 Volumi/giorno e con una fluttuazione dell’umidità relativa dell’ambiente circostante tra il 25% e il 70%. Di seguito verranno riportati lo schema di connessione tra il dispositivo e la vetrina, la fluttuazione della temperatura all’interno della stessa e l’andamento dell’umidità relativa della stanza comparata con quella interna alla teca, il cui target è del 45%.

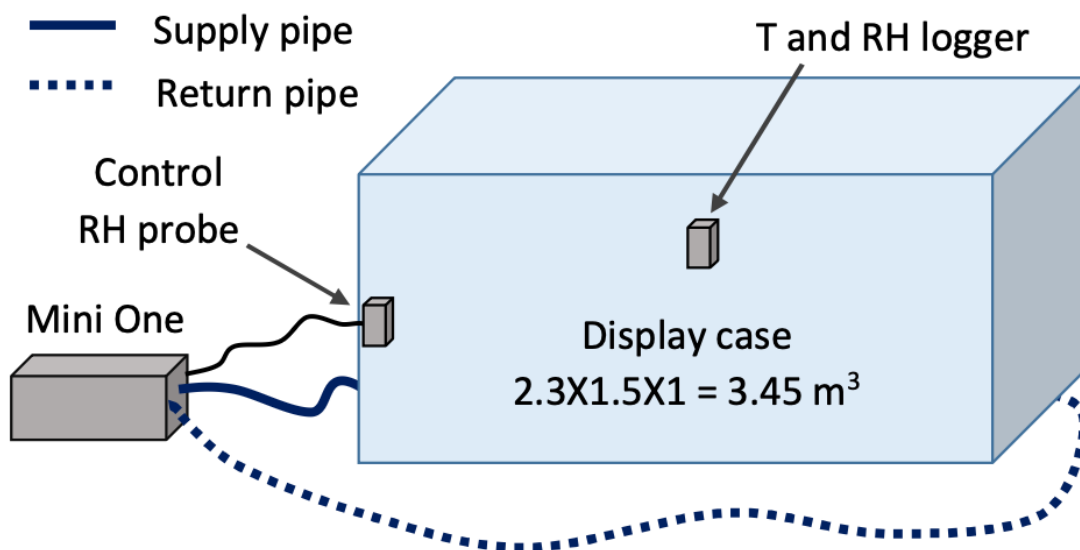


Figura 4-connessione tra vetrina e MiniOne

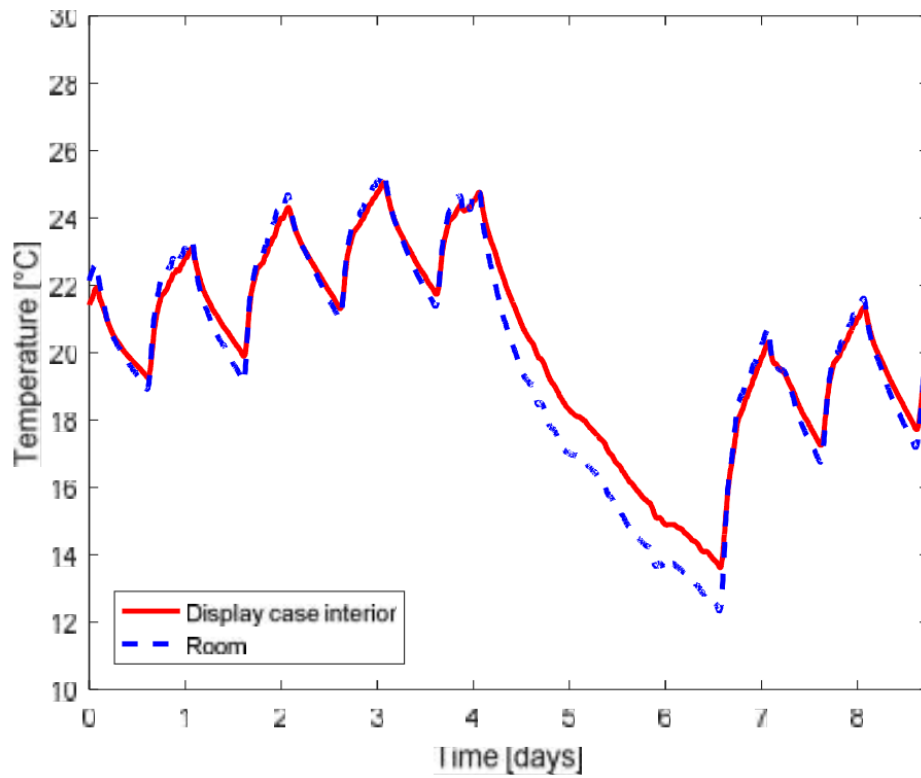


Figura 5-andamento temperatura durante il test

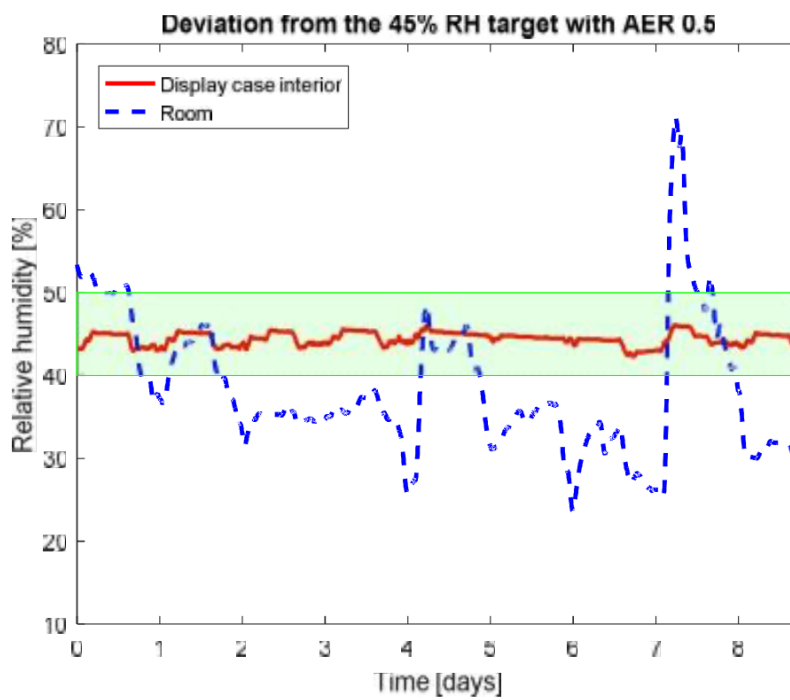


Figura 6-andamento UR durante il test

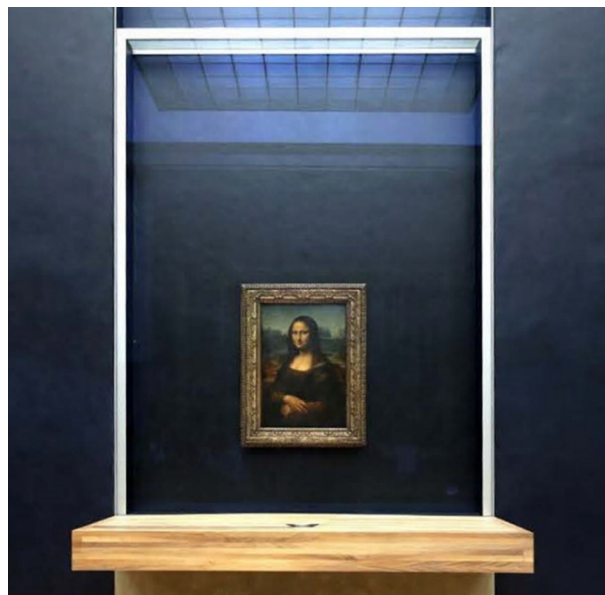
In questo specifico caso, l'obiettivo era quello di mantenere il valore di UR all'interno del range  $45 \pm 5\%$ , risultato ampiamente ottenuto.

Oltre alla soluzione presentata come esempio esistono delle altre quali:

- Serie "MiniClima EBC" che offre deumidificazione per ambienti per volumi di grandezza limitata ( $< 1m^3 - 10m^3$ )
- Serie "MCG4 e MCG8" di Lukko che, anche in questo, caso si occupa di stabilizzare l'umidità relativa per ambienti fino a  $8m^3$
- Serie "PMCG" di Preservatech che garantisce il mantenimento dell'umidità relative per piccoli volumi

Esistono, inoltre, aziende come Goppion spa che offrono soluzioni su misura per la climatizzazione delle vetrine espositive.

A queste soluzioni, che prevedono solo un controllo attivo, è molto usuale affiancare anche materiali igroscopici così da avere un controllo ibrido attivo/passivo che possa rendere la teca ancora più stabile dal punto di vista igrometrico. Un esempio molto famoso è il progetto "Mona Lisa" portato avanti sempre dall'azienda Goppion S.p.A. in collaborazione con il Politecnico di Milano che prevede due sistemi meccanici ridondanti progettati su misura e un letto di Silica gel per mantenere le condizioni operative tra  $18-21^\circ\text{C}$  per quanto riguarda la temperatura e  $50 \pm 10\%$  per quanto riguarda l'umidità relativa.



*Figura 7- La Mona Lisa, Museo del Louvre*

## 2.4 Confronto tra le varie soluzioni disponibili

Per comprendere a pieno quali sono le reali possibilità disponibili sul mercato, è necessario confrontare tra di loro i diversi dispositivi citati in precedenza, andando a valorizzare i punti di forza e i limiti di ognuno per poter pensare a ciò che si può fare per migliorare il controllo microclimatico applicato ad una vetrina espositiva.

Il confronto sarà effettuato considerando le seguenti caratteristiche:

- Controllo di temperatura: ci si chiede se il dispositivo integra al controllo dell'umidità relativa anche un controllo della temperatura
- Funzionamento e logiche di controllo: si vuole analizzare il principio fisico che utilizza il dispositivo e quali sono le logiche di controllo che regolano il funzionamento dello stesso
- Range di umidità relativa operativi: quali sono i valori di umidità relativa che riesce a garantire il dispositivo
- Consumi: potenza elettrica necessaria al funzionamento del dispositivo
- Volume lordo climatizzato: serve a capire per quali dimensioni di teca è adatta la macchina
- Ingombro della macchina
- Range di portate d'aria operativi: quali sono le portate d'aria che la macchina è in grado di climatizzare

<i>Dispositivo</i>	<i>MiniOne</i>	<i>EBC12</i>	<i>MCG4</i>	<i>MCG8</i>	<i>PMCG</i>
<i>Casa produttrice</i>	Preservatech	MiniClima	Lukko	Lukko	Preservatech
<i>Controllo temperatura</i>	No	No	No	No	No
<i>Principio di funzionamento</i>	L'aria ambiente viene aspirata da una pompa ad alta pressione a membrana e pressurizzata attraverso un modulo di controllo dell'umidità in un serbatoio d'acqua isolato. Una serpentina refrigerante e un riscaldatore elettrico mantengono l'acqua a una temperatura precisa per garantire l'umidità relativa richiesta dell'aria di mandata.	Si basa sul ricircolo dell'aria interna alla vetrina. L'aria viene estratta, misurandone l'UR e, se troppo secca, passa su una superficie umida; se troppo umida, viene raffreddata al di sotto del punto di rugiada e deumidificata.	Non fornito dal costruttore. Basandosi sul manuale e sulla scheda tecnica si può ipotizzare che la deumidificazione avvenga tramite il raffreddamento al di sotto del punto di rugiada, mentre l'umidificazione attraverso membrane in grado di rilasciare vapore.	Non fornito dal costruttore. Basandosi sul manuale e sulla scheda tecnica si può ipotizzare che la deumidificazione e avvenga tramite il raffreddamento al di sotto del punto di rugiada, mentre l'umidificazione attraverso membrane in grado di rilasciare vapore.	Utilizza tecnologia a stato solido: membrane trattengono o rilasciano umidità in base al gradiente di concentrazione. Quando l'UR supera il set-point, le membrane assorbono l'eccesso, rilasciandolo quando l'UR scende al di sotto.
<i>Logiche di controllo</i>	Sensori digitali controllabili via internet	Sensori digitali controllabili via app propria	Viene spesso integrato da PI o PID	Viene spesso integrato da PI o PID	Sensori digitali controllabili via internet
<i>Range UR operativi [%]</i>	35-80	15-85	35-75	35-75	20-60
<i>Consumi [W]</i>	65	200	65	125	25
<i>Volume climatizzato lordo [m<sup>3</sup>]</i>	10	10	8	<16	<2
<i>Ingombro (BxHxS)[mm]</i>	395x173x407	582x220x480	400x160x324	500x200x550	277x173x105
<i>Portata d'aria massima di infiltrazione [m<sup>3</sup> / giorno]</i>	<24	\	\	<3	\

Tabella 3-confronto tra i diversi dispositivi presenti sul mercato

Dalla tabella 3 è possibile ricavare diversi spunti per poter capire al meglio quali sono le reali possibilità che il mercato attualmente offre per la climatizzazione delle vetrine espositive.

Si intende innanzitutto illustrare i range operativi di umidità relativa per le diverse apparecchiature. In questo contesto, i dispositivi presentano valori di umidità operativa notevolmente simili. Infatti, ad eccezione dei dispositivi EBC 12 e PMCG, l'umidità relativa minima operativa delle apparecchiature è pari al 35%. Tale valore potrebbe non risultare

adeguato per materiali metallici, materiali cellulosici, quali pergamene o papiri, e materiali di natura organica. Al contrario, il valore massimo operativo delle diverse apparecchiature si attesta intorno all'80%, il che, pur garantendo una copertura per la maggior parte dei reperti, potrebbe risultare insufficiente in casi specifici.

I volumi climatizzati, in questo contesto, si attestano generalmente intorno ai 10 metri cubi. Il dispositivo PMCG, che si distingue per essere uno dei due dispositivi con il valore minimo di Umidità Relativa (UR) più basso, è l'unico specificamente progettato per vetrine di dimensioni ridotte. Ciò implica che, qualora le vetrine da climatizzare presentino dimensioni intermedie, i dispositivi attualmente disponibili potrebbero risultare eccessivamente sovradimensionati. Tale sovradimensionamento potrebbe comportare cicli di accensione e spegnimento eccessivamente frequenti, con conseguente aumento del rischio di guasti meccanici, riduzione dell'efficienza energetica del dispositivo, complessificazione del controllo dell'umidità e, infine, possibili fluttuazioni di Umidità Relativa all'interno della teca.

I consumi energetici variano significativamente tra i diversi dispositivi a causa di molteplici fattori, tra cui il volume climatizzato, l'intervallo operativo di umidità relativa e il principio di funzionamento. Determinare un consumo energetico tipico in termini assoluti risulta complesso, poiché è influenzato da parametri che differiscono tra le varie apparecchiature. Tuttavia, nel contesto della climatizzazione di un intero museo, il consumo energetico, basato sui valori di umidità relativa delle diverse vetrine, assume un'importanza cruciale.

Un ulteriore aspetto di rilevanza è rappresentato dalle logiche di controllo che consentono il monitoraggio e la regolazione del sistema di climatizzazione della teca. Generalmente, tutte le apparecchiature offrono la possibilità di misurare in tempo reale l'umidità relativa interna alla vetrina. I sensori installati sulle apparecchiature consentono di regolare la climatizzazione in funzione dell'umidità relativa interna misurata e forniscono agli operatori un andamento in tempo reale delle grandezze significative, in particolare temperatura e umidità.

Per quanto concerne l'ingombro, è opportuno conoscerlo in un'ipotetica installazione, ma in senso assoluto, tale grandezza non riveste un'importanza significativa per una valutazione comparativa delle diverse apparecchiature, in quanto l'ingombro deve essere compatibile con la vetrina e, pertanto, la sua valutazione deve essere effettuata in funzione della vetrina stessa.

Infine, per completare il confronto tra i dispositivi, si osserva che nessuna delle apparecchiature disponibili si occupa del controllo della temperatura. Questo aspetto è fondamentale per comprendere che, attualmente, se non progettate specificamente per il caso in esame, le apparecchiature si limitano al controllo dell'umidità relativa. Sebbene, come precedentemente affermato, l'umidità relativa sia il parametro più importante per la salvaguardia dei beni artistici contenuti nelle teche, sottovalutare l'influenza della temperatura potrebbe rappresentare un errore. Come illustrato nella Tabella 1, le linee guida UNI EN 10829:1999 [25] considerano la temperatura e lo sbalzo termico massimo come fattori di notevole importanza. Pertanto, applicare un controllo esclusivamente sull'umidità relativa non risulta essere ottimale.

A dimostrazione dell'influenza dell'andamento della temperatura all'interno della teca sulla conservazione dei beni artistici, si può fare riferimento alla Figura 5, dove si osserva che l'andamento della temperatura in una teca climatizzata con il dispositivo MiniOne segue quasi perfettamente il profilo della stanza in cui è contenuta la vetrina, garantendo, pertanto, in alcun modo che i reperti siano conservati in un ambiente che rispetti i valori di temperatura raccomandati dalla norma UNI EN 10829:1999. In tal modo, il rischio di deterioramento prematuro dei beni è concreto. Pertanto, questa tesi si propone di valutare delle possibili alternative che consentano un controllo attivo sia della temperatura che dell'umidità relativa.

### 3. Caso studio

In questo capitolo, l'obiettivo è quello di capire qual è la risposta di una vetrina espositiva alle sollecitazioni termo-igrometriche esterne per poi creare un modello su Open Studio in grado di riprodurre in maniera accurata il comportamento della teca.

Per fare ciò è stato necessario effettuare diversi test, andando a monitorare tramite delle termocoppie la temperatura interna in diversi punti della teca.



*Figura 8-set up sperimentale per le misure della temperatura*

L'obiettivo di questo test è stato di confrontare i risultati registrati dalle termocoppie in sei punti della teca con la temperatura esterna nel caso di ambiente non controllato, così da provare a quantificare alcuni dei parametri necessari alla costruzione del modello.

I risultati ottenuti sono i seguenti:

dati generali	foro umidità	centro	angolo	vetro	faretti	centro sinistra	ambiente
<b>T media(°C)</b>	24.41	24.40	24.39	24.30	25.84	24.40	23.84
<b>T_max(°C)</b>	25.92	26.53	25.89	25.27	26.68	25.22	25.40
<b>T_min(°C)</b>	23.39	23.36	23.08	22.94	24.44	23.52	23.20
<b><math>\Delta T(^{\circ}C)</math>_media</b>	0.57	0.56	0.54	0.46	1.99	0.56	\
<b><math>\Delta T(^{\circ}C)</math>_max</b>	0.52	1.13	0.49	-0.13	1.28	-0.18	\
<b><math>\Delta T(^{\circ}C)</math>_min</b>	0.19	0.16	-0.12	-0.26	1.24	0.32	\

Tabella 4 - risultati principali delle misure di temperature nella teca

## CONFRONTO TRA LE TERMOCOPPIE

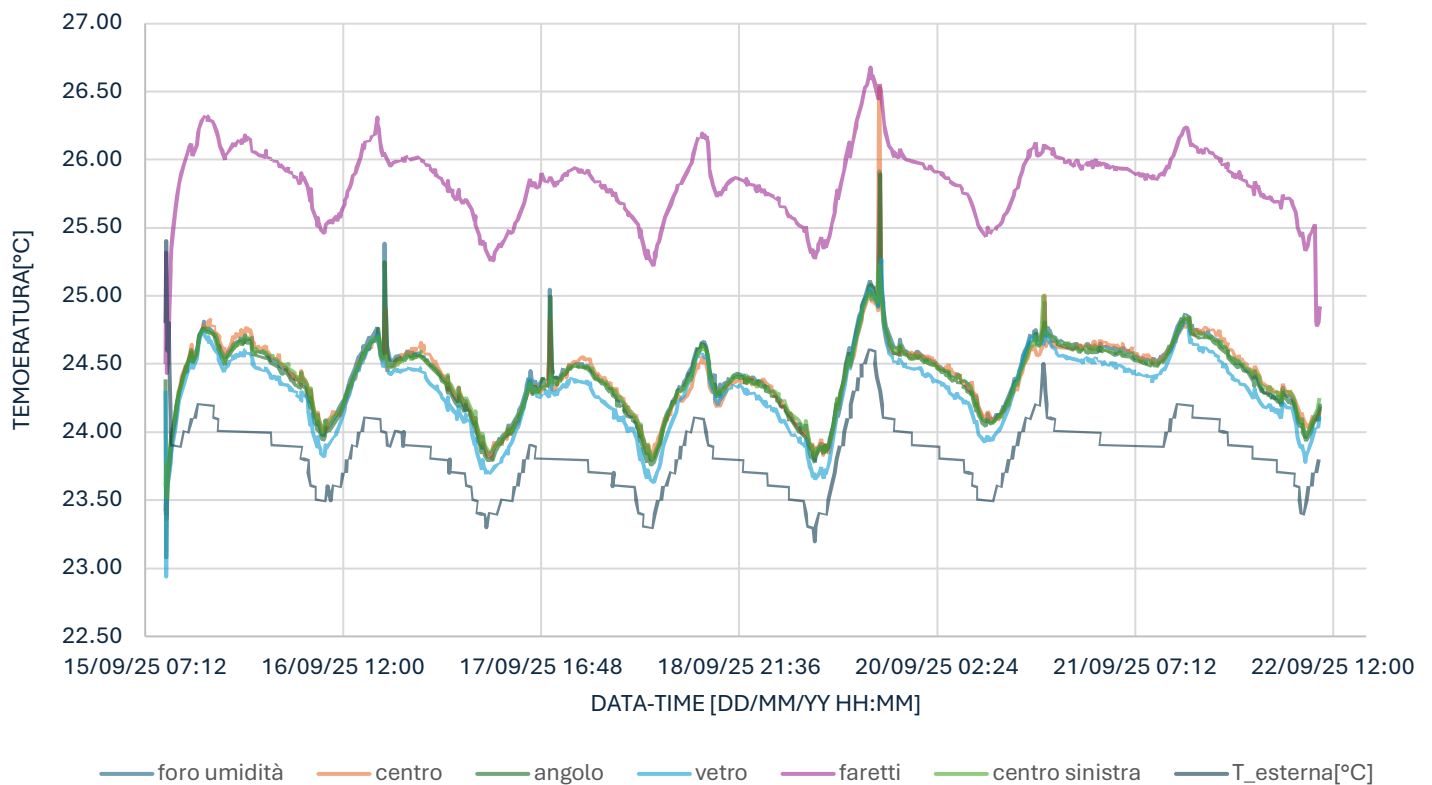


Figura 9- andamento temperatura per le diverse termocoppie

### 3.1 Costruzione del modello

Una volta ottenuti questi risultati, è stato possibile costruire il modello su OpenStudio. Prima, però, di impostare i parametri termo-fisici della teca, è stato necessario modellarla in 3D sul plugin di OpenStudio chiamato Sketchup.

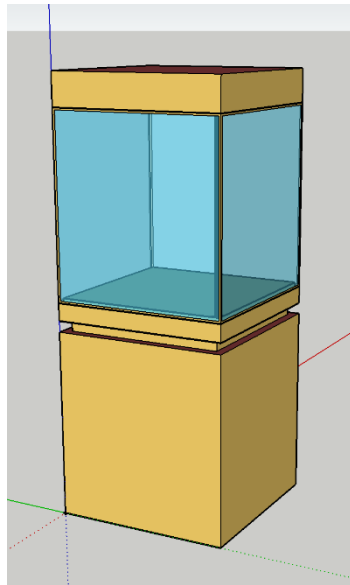


Figura 10- modello 3D della teca

Le dimensioni della vetrina sono state misurate e le caratteristiche principali sono le seguenti:

- Area di base =  $0.62 \text{ m}^2$
- Altezza =  $1.97 \text{ m}$
- Superficie vetrata =  $2.52 \text{ m}^2$
- Dimensioni interne della teca[cm] =  $79 \times 79 \times 84$
- Volume interno della teca [ $\text{m}^3$ ] =  $0,524$

Una volta definite le caratteristiche geometriche, sono state valutate le caratteristiche termofisiche della teca. In questo caso, essendo la teca un elemento molto più semplice di un edificio, gli unici elementi di cui definire le caratteristiche termofisiche sono il telaio in alluminio, la base in legno e il vetro.

### 3.1.1 Definizione delle caratteristiche termofisiche dell'involucro

Per il telaio in alluminio, sono stati inizializzati nella simulazione i valori termo-fisici delle principali tipologie di telai sul mercato. In particolare:

- Spessore = 10 mm
- Densità =  $2700 \frac{kg}{m^3}$
- Conducibilità =  $205 \frac{W}{m \cdot K}$
- Calore specifico =  $900 \frac{J}{KgK}$

Per quanto riguarda, invece, la base in legno, basandosi sempre sui dati disponibili, i valori quantificati sono i seguenti:

- Spessore = 10 mm
- Densità =  $800 \frac{kg}{m^3}$
- Conducibilità =  $0.2 \frac{W}{m \cdot K}$
- Calore specifico =  $2000 \frac{J}{KgK}$

Infine, per il vetro, è stato necessario stabilire esclusivamente la trasmittanza termica. In particolare, in questo caso il valore stabilito per la simulazione è il seguente:

- Trasmittanza termica del vetro =  $4 \frac{W}{m^2 K}$

The image shows three panels from the OpenStudio software interface, detailing the material properties for aluminum, wood, and glass. Each panel includes fields for Roughness, Thickness, Conductivity, Density, Specific Heat, Thermal Absorptance, Solar Absorptance, and Visible Absorptance. The aluminum and wood panels have values for all these properties, while the glass panel only has a U-Factor value.

Material	Roughness	Thickness (m)	Conductivity (W/m-K)	Density (kg/m³)	Specific Heat (J/kg-K)	Thermal Absorptance	Solar Absorptance	Visible Absorptance	U-Factor (W/m²-K)
Aluminum	Smooth	0.010000	205.000000	2700.000000	900.000000	0.900000	0.700000	0.700000	
Wood	Smooth	0.010000	0.200000	800.000000	2000.000000	0.900000	0.700000	0.700000	
Glass									3.900000

Figura 11-caratteristiche termofisiche dei materiali della teca impostate su OpenStudio

Una volta definite le grandezze termofisiche dell'involucro, è stato necessario provare a definire i carichi da inserire nella simulazione.

### 3.1.2 Definizione del carico di illuminazione

Come primo step, si è dovuta definire la potenza elettrica dei faretti che illuminano la teca, accesi per tutta la durata dei test. Per fare ciò, un elemento fondamentale che ha permesso la quantificazione è stata la differenza di temperatura tra le termocoppie sparse nella teca e quella posizionata esattamente al centro dei 4 faretti.

Come visibile in figura 9, la termocoppia posizionata vicino ai faretti presenta una temperatura maggiore rispetto alle altre, come prevedibile, e basandosi proprio su questa considerazione che è stato possibile quantificare la potenza elettrica.

Per ricavare la potenza elettrica sono state utilizzate le seguenti relazioni:

$$P_{conv} = A * h_c * \Delta T$$

$$P_{el} = \frac{P_{conv}}{f_{conv}}$$

Dove:

- A è la superficie colpita dalla luce dei faretti, dunque l'intera superficie interna della teca [ $m^2$ ];
- $h_c$  è il coefficiente di scambio termico convettivo [ $\frac{W}{m^2K}$ ];
- $\Delta T$  è la differenza di temperatura media tra le altre cinque termocoppie e quella posizionata vicino ai faretti [ $^{\circ}C$ ];
- $f_{conv}$  è la frazione convettiva [-].

Da queste relazioni è stato possibile calcolare il valore della potenza elettrica dei faretti.

<b>media T teca[<math>^{\circ}C</math>]</b>	24.39
<b>media T faretti[<math>^{\circ}C</math>]</b>	25.84
<b><math>\Delta T</math>[<math>^{\circ}C</math>]</b>	1.45
<b>frazione convettiva [-]</b>	0.45
<b>hc[W/m<sup>2</sup>K]</b>	5.00
<b>base[m]</b>	0.79
<b>profondità[m]</b>	0.79

<b>altezza[m]</b>	0.84
<b>superficie interna della teca[m2]</b>	3.90
<b>Pconv[W]</b>	28.26
<b>Pel[W]</b>	62.79

Partendo da questo primo risultato, il carico impostato nella simulazione scelto è stato di 60W, andando a considerare oltre al calcolo, anche le soluzioni disponibili sul mercato.

**Name:**

**Lighting Power:**  W    **Watts Per Space Floor Area:**  W/m<sup>2</sup>    **Watts Per Person:**  W/person

**Fraction Radiant:**     **Fraction Visible:**

**Return Air Fraction:**

Figura 12-carico per illuminazione impostato su OpenStudio

### 3.1.3 Definizione del carico per infiltrazioni

Per definire il carico dovuto alle infiltrazioni, al contrario rispetto all'illuminazione, dove è stato possibile procedere per via analitica, è stato necessario effettuare dei test sperimentali per riuscire a dare un valore alle infiltrazioni all'interno della teca. Il test si è svolto andando ad iniettare all'interno della vetrina sia il gas  $SF_6$  che l'anidride carbonica, per poi andare a valutare il decadimento delle due, così da riuscire a valutare i ricambi orari della teca stessa.

Per questo test è stato utilizzato un macchinario adatto a valutare la concentrazione di diversi gas all'interno della teca.

Il macchinario Bruel & Kjaer per il controllo della concentrazione dei gas è un analizzatore di gas progettato per la misurazione precisa di vari componenti quali anidride carbonica ( $CO_2$ ), ossigeno,  $SF_6$  e altri gas nell'aria ambientale.

Questo strumento sfrutta in genere la spettroscopia a infrarossi non dispersiva (NDIR) per la rilevazione selettiva di specifici gas, oppure sensori elettrochimici per il monitoraggio di gas come ossigeno o monossido di carbonio.

Componenti principali:

- Un'unità di campionamento in cui viene fatta transitare l'aria prelevata dal punto della misura.
- Un sistema ottico con una sorgente di radiazione infrarossa e un rivelatore, per identificare le concentrazioni dei gas target sulla base dell'assorbimento a diverse lunghezze d'onda.
- Interfaccia digitale o analogica per la raccolta e la registrazione dei dati.
- Spesso display integrato per la visualizzazione diretta delle concentrazioni rilevate in tempo reale.

Applicazioni:

- Analisi della qualità dell'aria interna
- Controllo ambientale in laboratori, musei, archivi e ambienti industriali
- Monitoraggio della concentrazione di CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, e altri gas in modo continuo.

Specifiche tipiche:

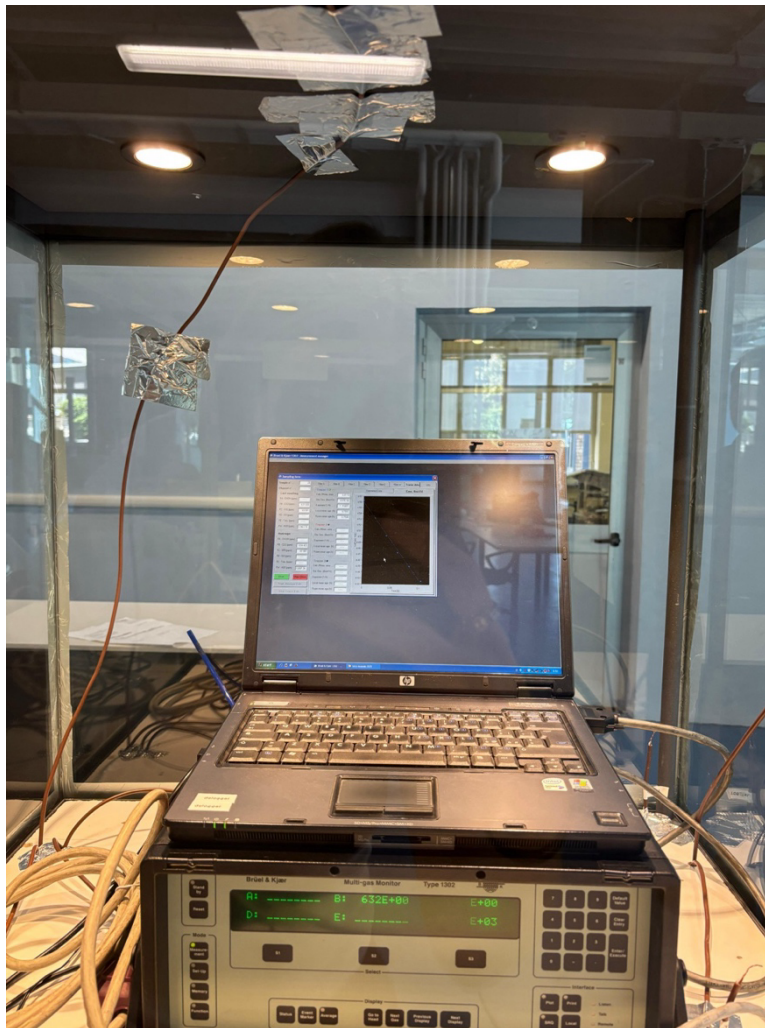
- Riconoscimento multigas
- Elevata sensibilità, spesso con range selezionabili in diversi ordini di grandezza (ppm, %)
- Uscite dati per collegamento a computer o sistemi di supervisione

Gli analizzatori Bruel & Kjaer sono noti per la loro affidabilità, precisione elevata, possibilità di raccolta dati su lungo periodo e l'ampia compatibilità con sensori accessori.



Figura 13-analizzatore Bruel & Kjaer

Il set-up per il test è visibile nell'immagine seguente.



*Figura 15-set up sperimentale per prova di tenuta*

### 3.2 Prova di tenuta

Le prove di tenuta effettuate sono servite a dare un valore sperimentale di tasso di ricambi orari alla teca andando ad osservare il decadimento di due gas, quali il gas  $SF_6$  e la  $CO_2$ .

La procedura per il test è la seguente:

- Osservazione della concentrazione di fondo
- Iniezione del gas
- Osservazione del decadimento
- Calcolo del tasso di ricambi orari

La concentrazione di fondo gioca un ruolo fondamentale, soprattutto nel caso della  $CO_2$  che è effettivamente presente in ambiente, mentre nel caso del  $SF_6$  la concentrazione iniziale è trascurabile in quanto non presente in ambiente.

L'iniezione dei gas è avvenuta tramite una siringa per l'  $SF_6$  e tramite bombola per la  $CO_2$ , essendo diverse le concentrazioni da raggiungere per i due gas.

Il decadimento all'interno della teca dei due diversi gas è stato osservato tramite l'analizzatore Bruel & Kjaer, che mostra l'andamento della concentrazione dei due gas in tempo reale e che permette di tracciare le curve di decadimento per arrivare alla stima del tasso di ricambi orari.

Il calcolo del tasso di ricambi orari parte dall'analisi delle curve di best fit di decadimento, definendo l'equazione dell'andamento della concentrazione come:

$$\langle C \rangle (t) = \langle C_0 \rangle e^{-\lambda t}$$

Dove:

- $\langle C \rangle (t)$  è la concentrazione al tempo t;
- $\langle C_0 \rangle$  è la concentrazione di fondo;
- $\lambda$  è proprio il tasso di ricambi orari stimato.

### 3.2.1 Risultati ottenuti

Di seguito sarà visibile un elenco con i test effettuati.

Storico test	Descrizione test	Gas	Strumentazione	Durata del test [h]	Dettagli iniezione
Test_01	Test decadimento $SF_6$	$SF_6$	Bruel & Kjaer	2,92	$SF_6$ iniettato $\approx 127$ ppm.
Test_02	Test decadimento $SF_6$	$SF_6$	Bruel & Kjaer	1,91	$SF_6$ iniettato $\approx 80$ ppm.

Test_03	Test decadimento SF <sub>6</sub>	SF <sub>6</sub>	Bruel & Kjaer	2,55	SF <sub>6</sub> iniettato ≈ 92 ppm.
Test_04	Test decadimento SF <sub>6</sub>	SF <sub>6</sub>	Bruel & Kjaer	2,37	SF <sub>6</sub> iniettato ≈ 83 ppm.
Test_05	Test decadimento SF <sub>6</sub>	SF <sub>6</sub>	Bruel & Kjaer	4,24	SF <sub>6</sub> iniettato ≈ 77 ppm.
Test_06	Test decadimento SF <sub>6</sub> + CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> ; SF <sub>6</sub>	Bruel & Kjaer	4	CO <sub>2</sub> ≈ +1700 ppm rispetto al fondo; SF <sub>6</sub> ≈ 80 ppm.
Test_07	Test decadimento SF <sub>6</sub> + CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> ; SF <sub>6</sub>	Bruel & Kjaer	3,5	CO <sub>2</sub> ≈ +3530 ppm rispetto al fondo; SF <sub>6</sub> ≈ 77 ppm.

Da questi test sono stati ottenuti i seguenti risultati:

Test	Gas	C <sub>0</sub>	C <sub>fin</sub>	Inizio decadimento	Fine decadimento	ΔT	λ
[-]	[-]	[ppm]	[ppm]	[h]	[h]	[°C]	h <sup>-1</sup>
<b>Test_01</b>	SF <sub>6</sub>	91	17	12	2,92	5	0,65
<b>Test_02</b>	SF <sub>6</sub>	76	11	0,13	1,91	5	1,06
<b>Test_03</b>	SF <sub>6</sub>	85	10	0,22	2,55	5	0,91
<b>Test_04</b>	SF <sub>6</sub>	74	10	0,05	2,37	5	0,85
<b>Test_05</b>	SF <sub>6</sub>	75	15	0,34	4,24	5	0,41

<b>Test_06</b>	SF <sub>6</sub>	75	13	1,54	5,18	5	0,48
	CO <sub>2</sub>	1644	187	1,24	5,18	5	0,54
<b>Test_07</b>	SF <sub>6</sub>	69	16	0,68	3,93	5	0,46
	CO <sub>2</sub>	3532	602	0,45	3,93	5	0,51

In questo caso, i risultati ottenuti che sono stati poi utilizzati come riferimento sono relativi all'ultimo test, di cui è possibile osservare le curve di decadimento di SF<sub>6</sub> e CO<sub>2</sub> di seguito.

### FIT ESPONENZIALE E STIMA ACH - SF6

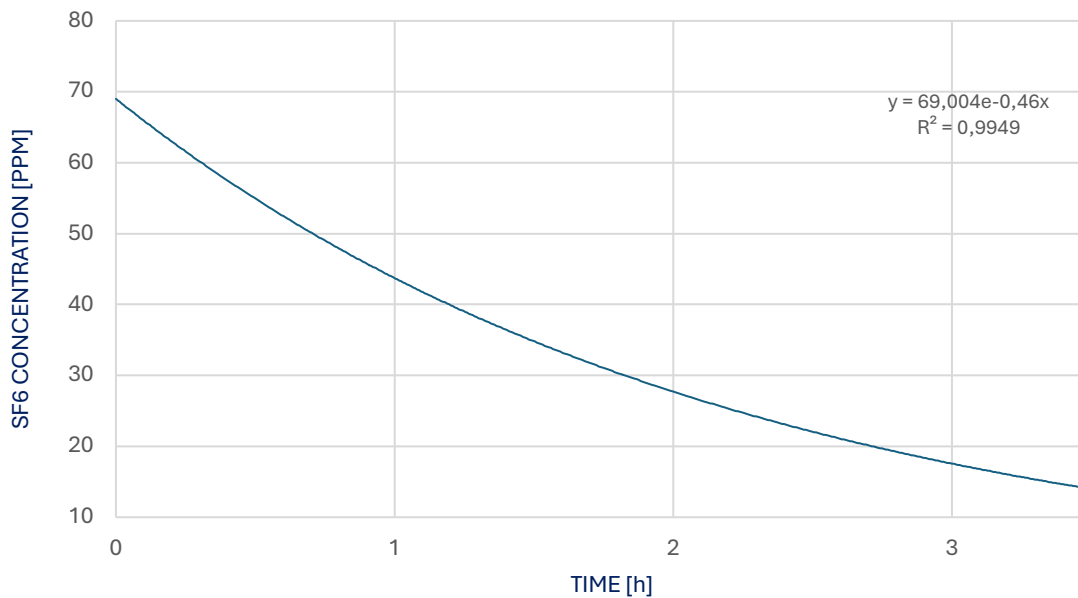


Figura 16-curve di best fit per la stima del tasso di ricambi orari per SF6

## FIT ESPONENZIALE E STIMA ACH – CO<sub>2</sub>

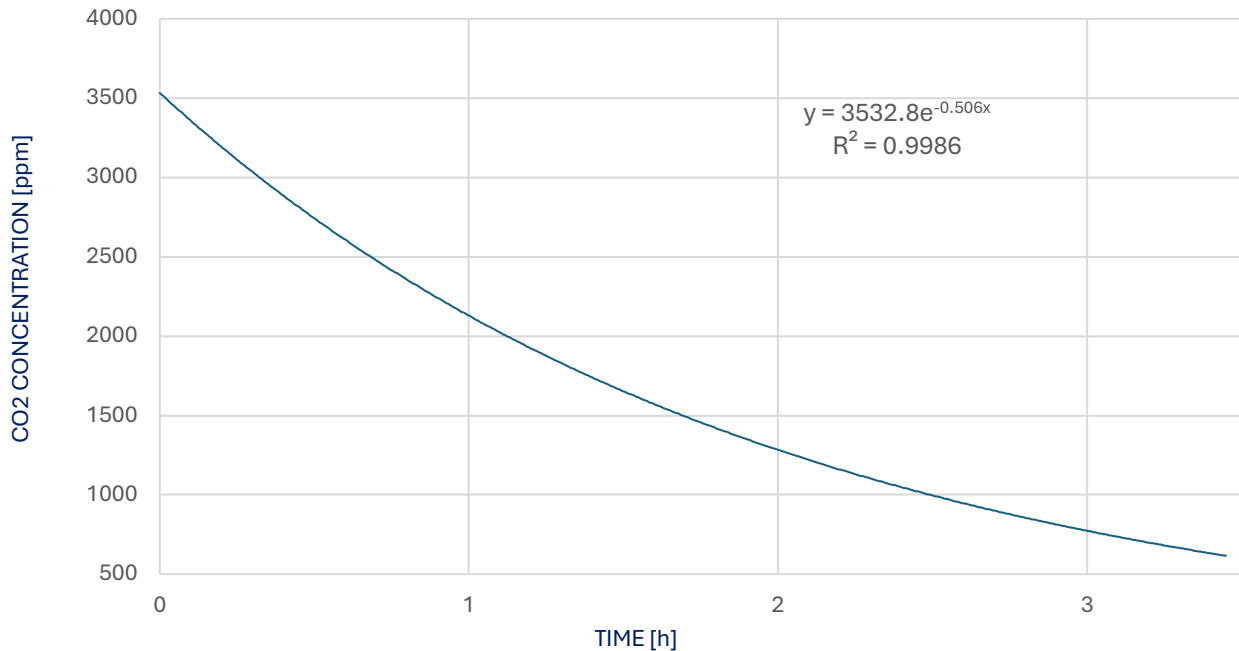


Figura 17-curve di best fit per la stima del tasso di ricambi orari per CO<sub>2</sub>

Da questi risultati si evince una leggera differenza tra SF<sub>6</sub> e CO<sub>2</sub>, visibile anche nel Test 6. In generale, questo potrebbe essere spiegato dalla diversa massa molecolare e dalla densità tra i due gas, che porta a concludere che l'anidride carbonica tende a diffondere più facilmente dell'esafluoruro di zolfo e dunque tende ad avere un tasso di ricambi orari leggermente più alto.

Per la simulazione, il tasso di ricambi orari dovuto alle infiltrazioni scelto è stato di 0.51 h<sup>-1</sup> per essere il più cautelativo possibile e perché il comportamento della CO<sub>2</sub> rappresenta meglio il comportamento dell'aria rispetto all'SF<sub>6</sub>.

### 3.3 Risultati della simulazione

Partendo, dunque, dai carichi illustrati in precedenza, è possibile andare a visualizzare i risultati del modello e confrontarli con i dati misurati per valutarne la qualità.

Per cominciare, di seguito sarà illustrato l'andamento della temperatura esterna.

## TEMPERATURA ESTERNA(°C)

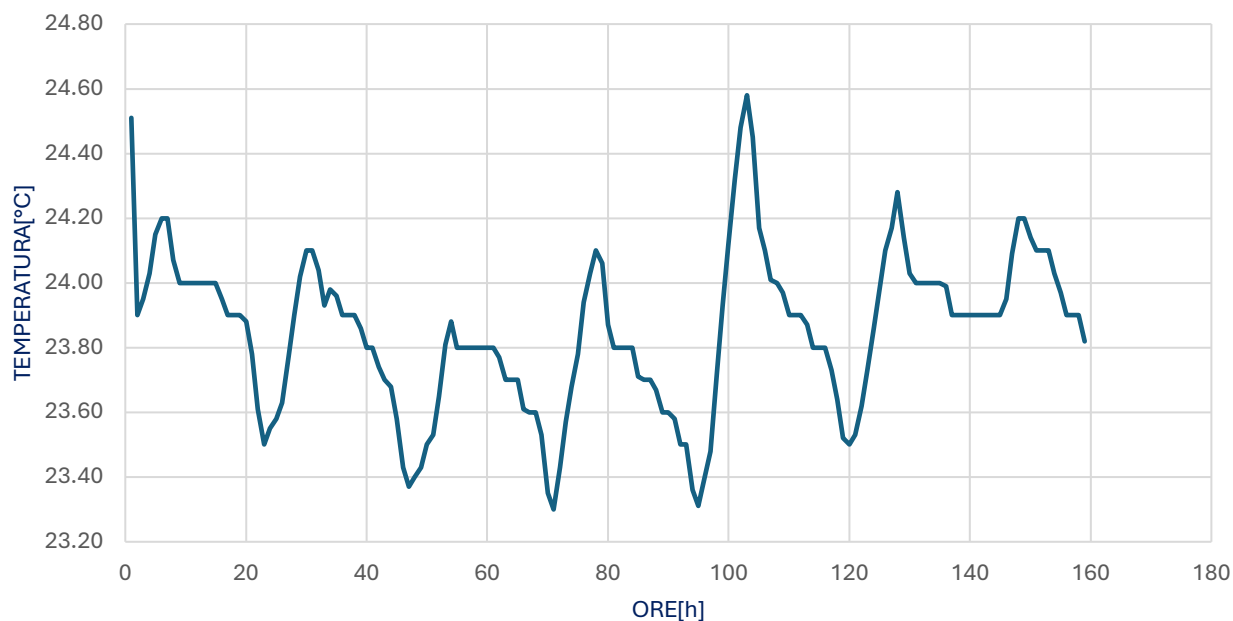


Figura 18-andamento temperatura esterna per il periodo della simulazione

Una volta definite tutte le variabili richieste dal software OpenStudio, è possibile osservare i risultati ottenuti dalla simulazione.

Di seguito sarà illustrato l'andamento della temperatura ottenuto tramite la simulazione.

## RISULTATI SIMULAZIONE

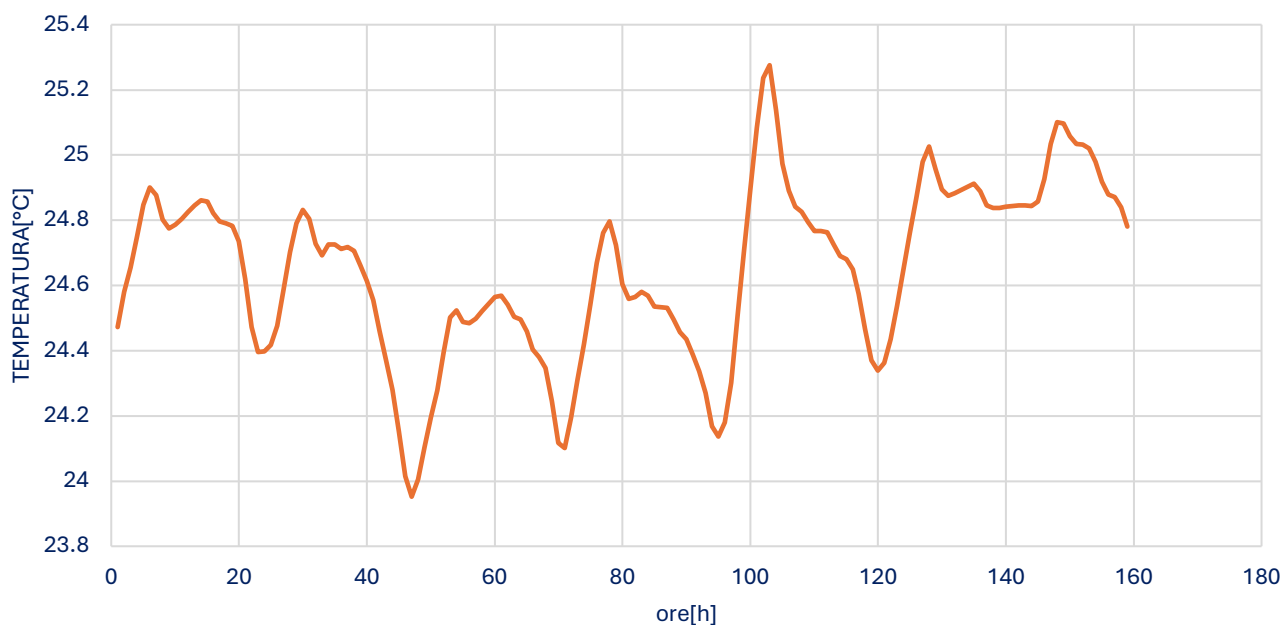


Figura 19-andamento temperatura ottenuta dalla simulazione

Una volta ottenuti questi risultati, occorre valutare se rappresentano effettivamente l'andamento reale della temperatura all'interno della teca. Per fare ciò, si utilizza come target il valore medio di temperatura registrato dalle termocoppie. Così facendo, si ha effettivamente un confronto tra la temperatura media interna della teca misurata con la temperatura ottenuta grazie al modello.

## TEMPERATURA MEDIA DEI DATI MISURATI

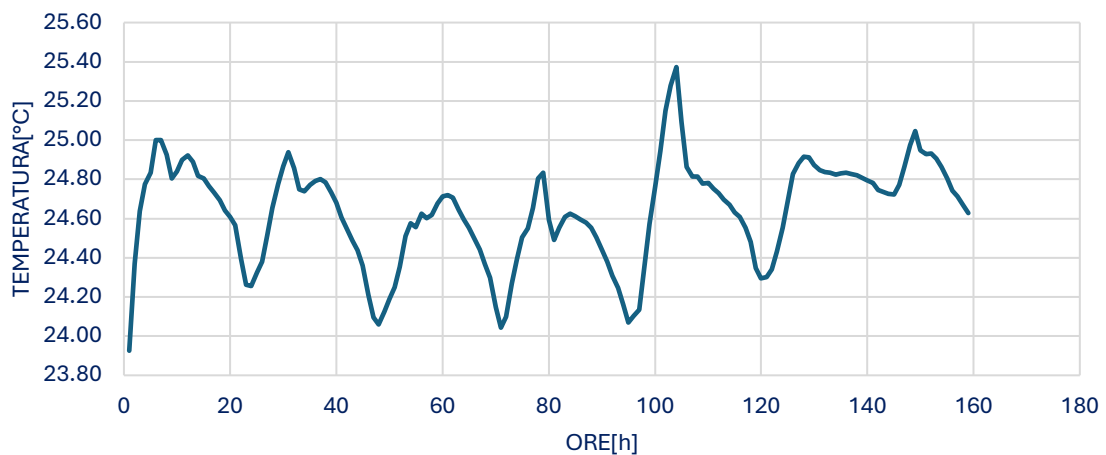


Figura 20-andamento temperatura media interna della teca ottenuta con i dati misurati

Andando poi a rappresentare il confronto sul grafico si ottiene:

## CONFRONTO TRA SIMULAZIONE E DATI MISURATI

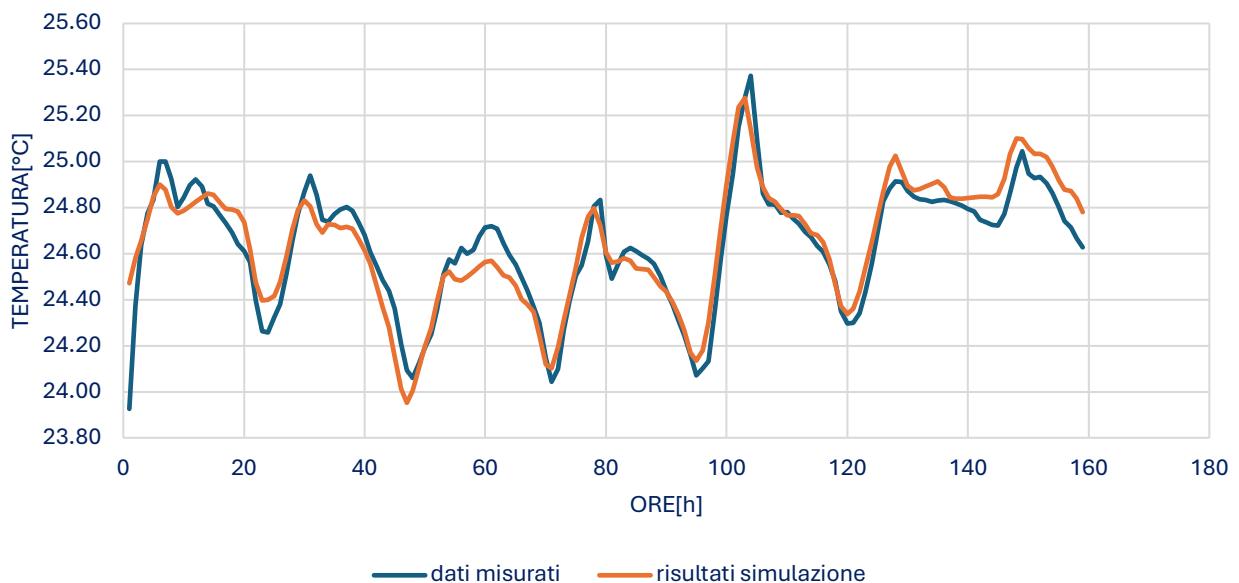


Figura 21-confronto tra simulazione e dati misurati sperimentalmente

Andando poi ad analizzare dal punto di vista statistico i risultati si ottengono i seguenti andamenti di scostamento assoluto e relativo.

### SCOSTAMENTO ASSOLUTO(°C)

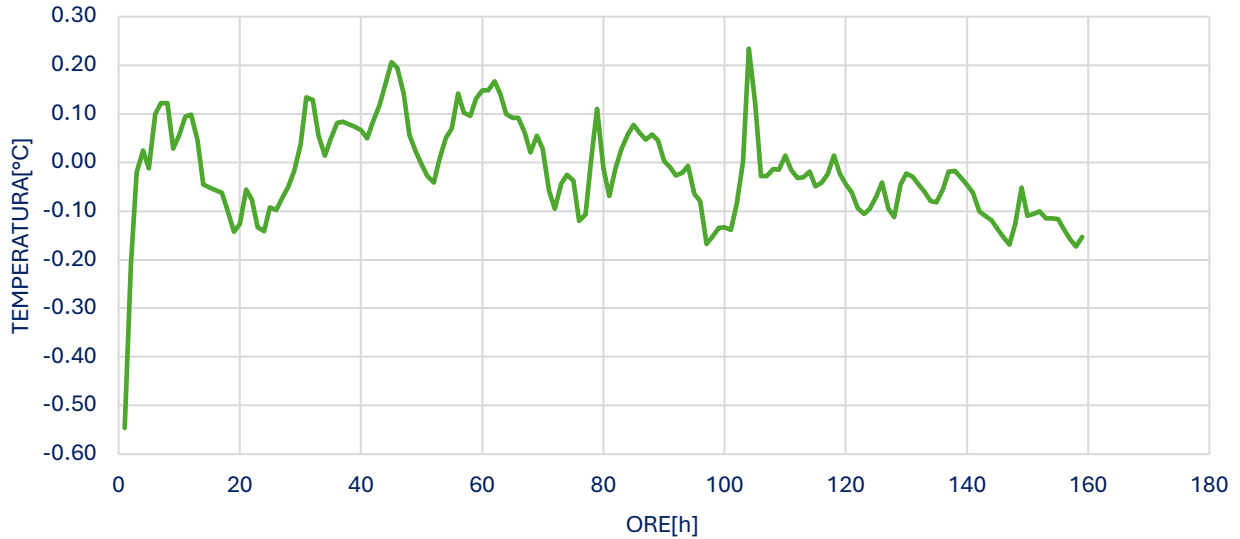


Figura 22-andamento scostamento assoluto

### SCOSTAMENTO RELATIVO(%)

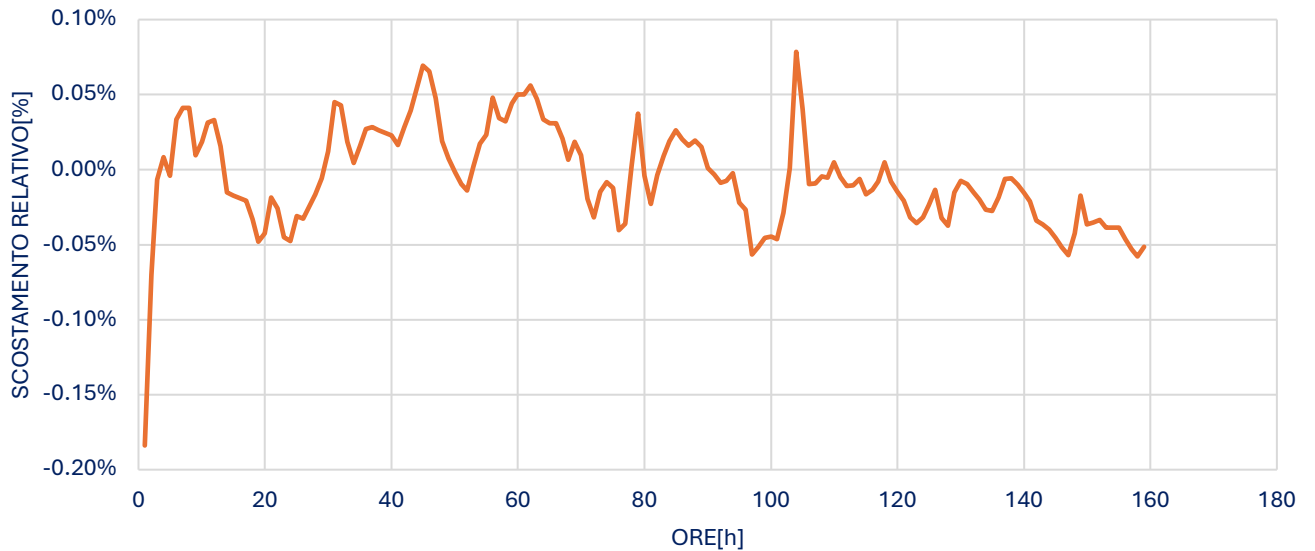


Figura 23-andamento scostamento relativo

L'andamento degli scostamenti può essere, inoltre, sintetizzato tramite la seguente tabella, utile per andare a quantificare la differenza tra modello e dati sperimentali.

Tabella 5-scostamento relativo ed assoluto medi

scostamento assoluto medio(°C)	scostamento relativo medio (%)
0.08	0.03

Da questi primi risultati, si può concludere che il modello risulti essere molto accurato e dunque affidabile per la rappresentazione del comportamento della teca.

Infine, come ultima verifica statistica, si è cercata la correlazione tra i valori misurati e ottenuti tramite simulazione, andando a costruire un grafico con i dati sperimentali sulle ascisse e i dati simulati sulle ordinate, andando ad osservare come si disponessero i punti. La correlazione statistica si verifica se i dati si dispongono lungo la bisettrice del primo e terzo quadrante. Di seguito vi è il grafico con la linea di tendenza e il valore di  $R^2$ .

## SCATTER PLOT CON LINEA DI TENDENZA

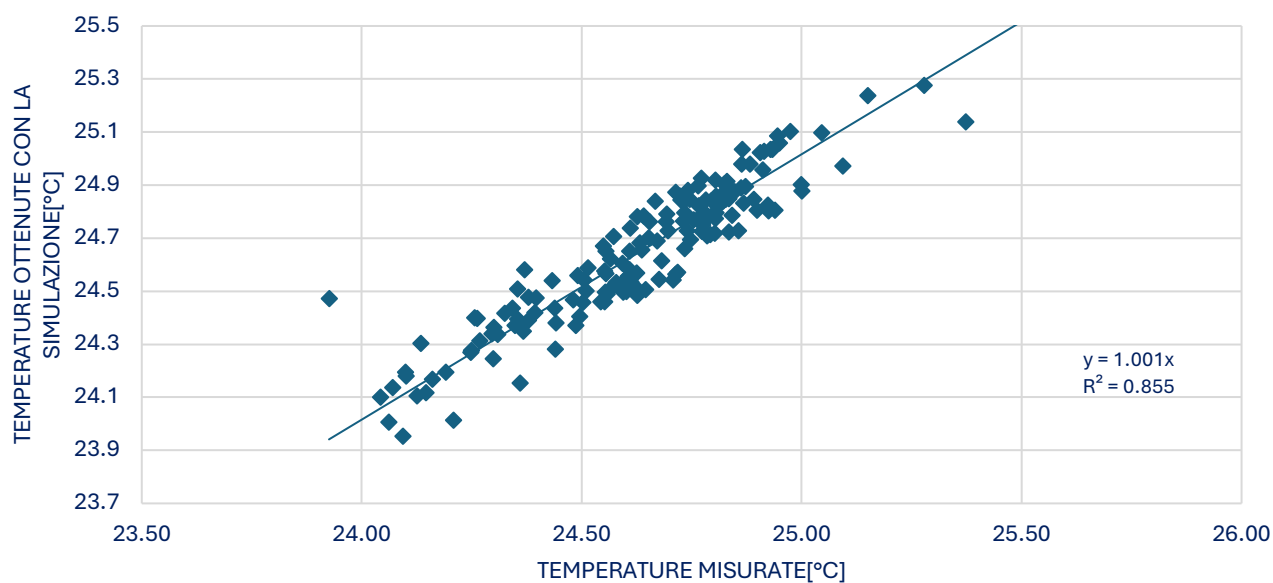


Figura 24- scatter plot con linea di tendenza

## 4. Test effettuati

Nel presente capitolo saranno descritti e analizzati in dettaglio tutti i test condotti sulla teca, oltre a quelli illustrati per la realizzazione del modello, al fine di comprendere il suo comportamento in risposta a diverse condizioni ambientali.

### 4.1 Test 06/10/2025

Al fine di avviare l'analisi del comportamento della teca, si è optato per l'esecuzione di un test in condizioni ambientali altamente specifiche. Tale approccio consente di valutare l'impatto delle condizioni esterne sul comportamento della teca e di validare ulteriormente il modello, sottoponendolo a condizioni operative radicalmente diverse da quelle in cui è stato originariamente sviluppato.

Il test è stato realizzato con l'ausilio della BET, una camera climatica in grado di riprodurre al suo interno condizioni climatiche prestabilite.

#### 4.1.1 Set up sperimentale

Il set up sperimentale per questo test è il seguente:



*Figura 25-set up sperimentale per il test a 0 gradi*

Le condizioni predefinite per il test sono le seguenti:

- Durata del test: 72h
- Condizioni esterne: temperatura controllata a 0 gradi e UR del 50%
- Luci interne alla teca sempre accese
- Luci della BET spente

Per quanto riguarda, invece, la strumentazione utilizzata, i dispositivi scelti sono i seguenti:

- Termocoppie, nella disposizione visibile in figura 8, per il controllo della temperatura interna
- Termometro Testo 174T per il controllo di temperatura e umidità relativa interne
- Sensori della BET, per il controllo della temperatura e umidità relativa esterne



Figura 26-Termometro TESTO

#### 4.1.2 Risultati ottenuti

Di seguito verrà mostrato l'andamento delle condizioni esterne alla teca ed interne alla BET.

## ANDAMENTO DI T E UR DELLA BET

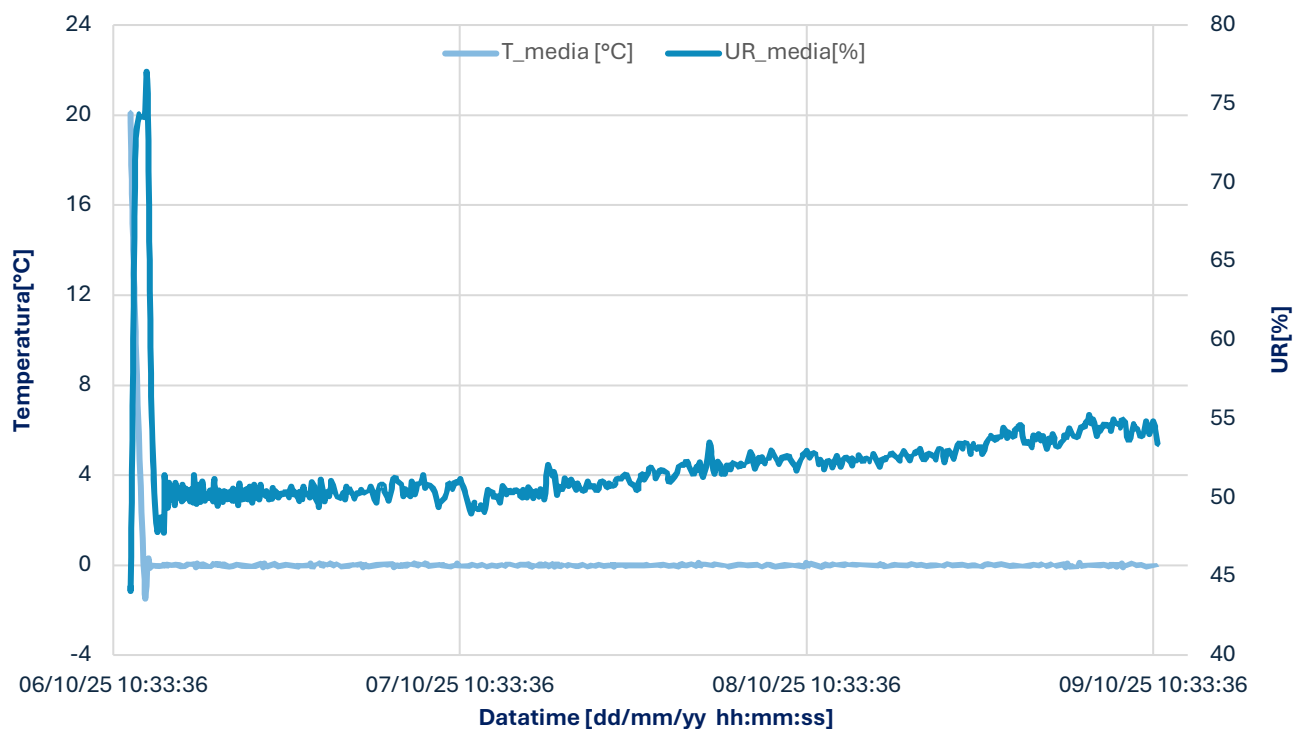


Figura 27-andamento di temperatura e umidità relativa della BET

Questi andamenti hanno prodotto come risultato nella teca un andamento di temperatura visibile nella seguente figura.

## CONFRONTO TRA GLI ANDAMENTI DI TEMPERATURA MISURATI E TEMPERATURA ESTERNA

T\_testo[°C]    T\_media\_BET[°C]    T\_interna\_media\_termocoppie[°C]

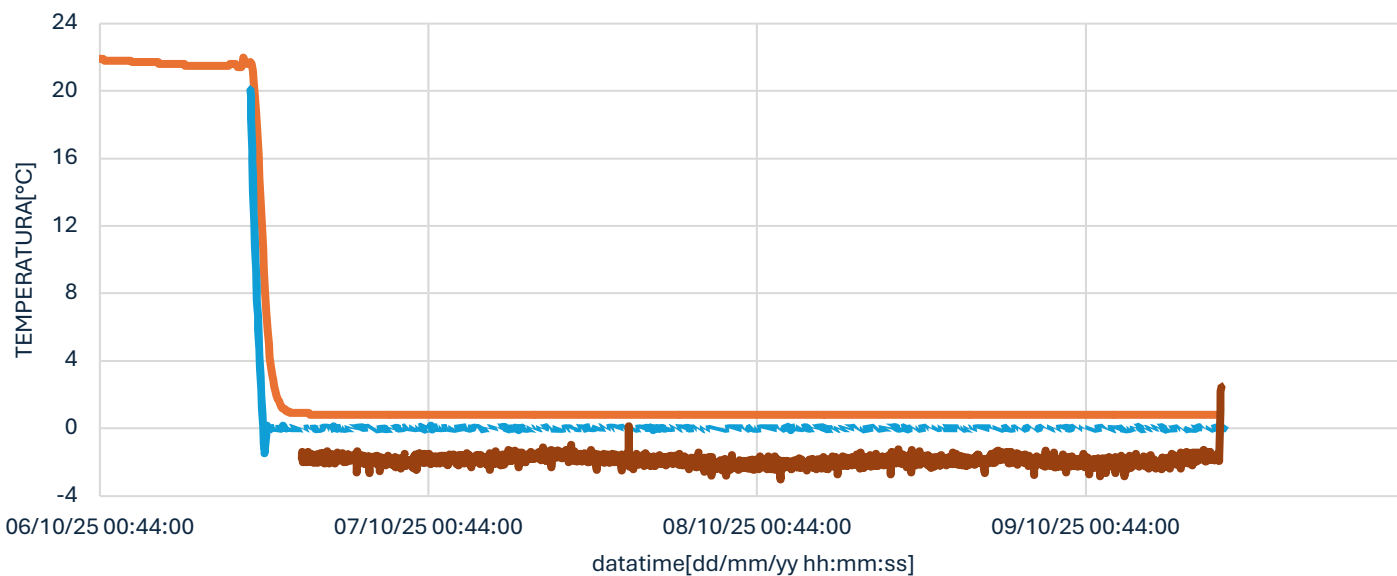


Figura 28-andamenti di temperatura misurati con il Testo e con le termocoppie confrontati con l'andamento di temperatura interna della BET

L'analisi del grafico evidenzia una discrepanza tra i dati raccolti tramite termocoppie e quelli ottenuti con il dispositivo Testo. Tale discrepanza potrebbe essere attribuita al metodo di calcolo utilizzato per le termocoppie, che si basa sulla media dei valori rilevati da sei sensori, alcuni dei quali posizionati all'esterno della teca. Inoltre, la temperatura rilevata risulta inferiore a quella esterna, suggerendo la presenza di un errore sistematico nelle misurazioni effettuate dalle termocoppie, che forniscono un valore di temperatura inferiore a quello reale.

Andando, poi, a confrontare i risultati ottenuti per quanto concerne l'umidità relativa, è possibile visualizzarli nel seguente grafico.

## CONFRONTO TRA GLI ANDAMENTI DI UR MISURATI E UR ESTERNA

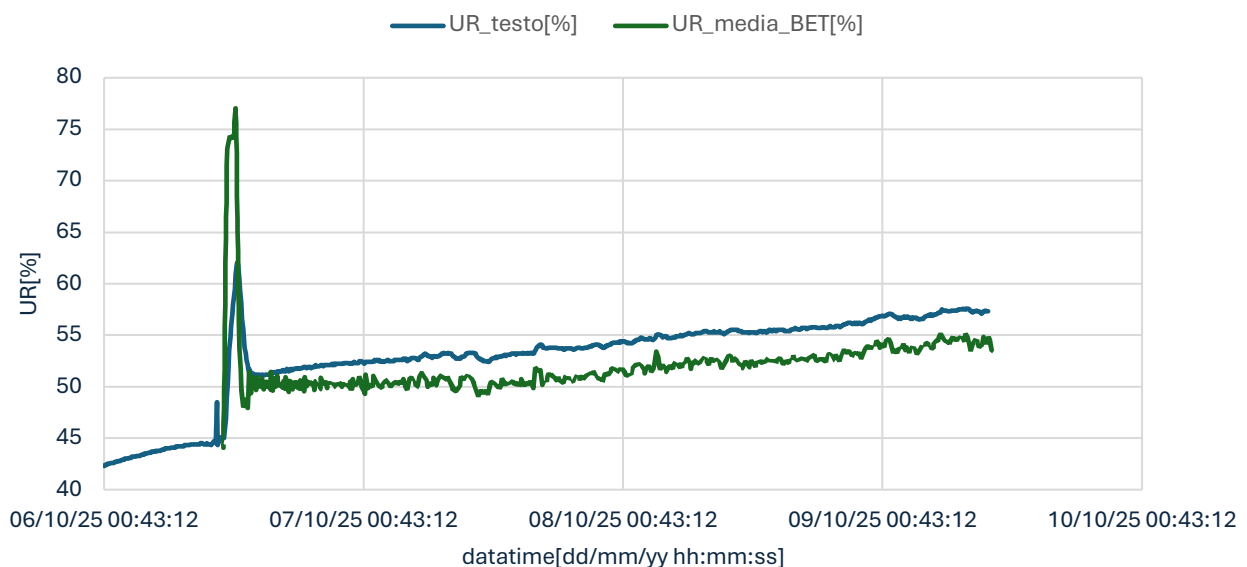


Figura 29-andamento dell'umidità relativa misurata con il Testo confrontato con quello della BET

Osservando questi due andamenti, si può notare come la forma è molto simile, ma traslata verso valori maggiori. Andando inoltre a voler validare ulteriormente il modello numerico realizzato su SketchUp, impostando le stesse condizioni al contorno, ovvero gli andamenti di temperatura e umidità impostati alla BET, sono stati ottenuti i seguenti risultati.

## ANDAMENTO T E UR OTTENUTI CON LA SIMULAZIONE

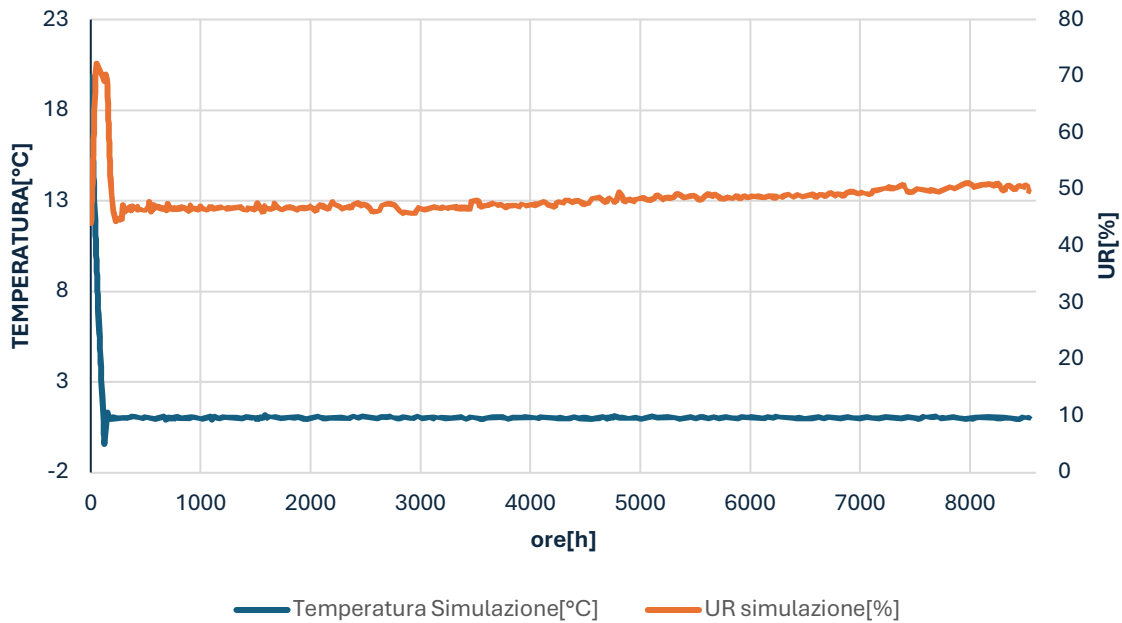


Figura 30- andamento di temperatura e umidità relativa ottenuti dalla simulazione

Andandoli, poi, a confrontare con i dati misurati si ottiene:

## CONFRONTO TRA GLI ANDAMENTI DI TEMPERATURA MISURATI, VALORI OTTENUTI CON LA SIMULAZIONE E TEMPERATURA ESTERNA

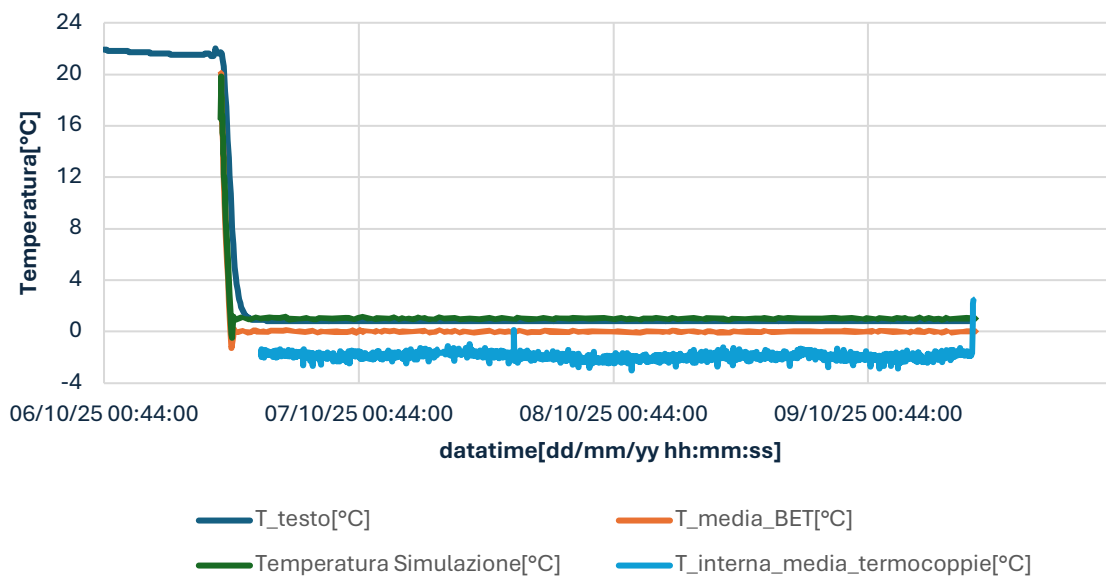


Figura 31- confronto tra i vari andamenti di temperatura

## CONFRONTO TRA GLI ANDAMENTI DI UR MISURATI, VALORI OTTENUTI CON LA SIMULAZIONE E UR ESTERNA

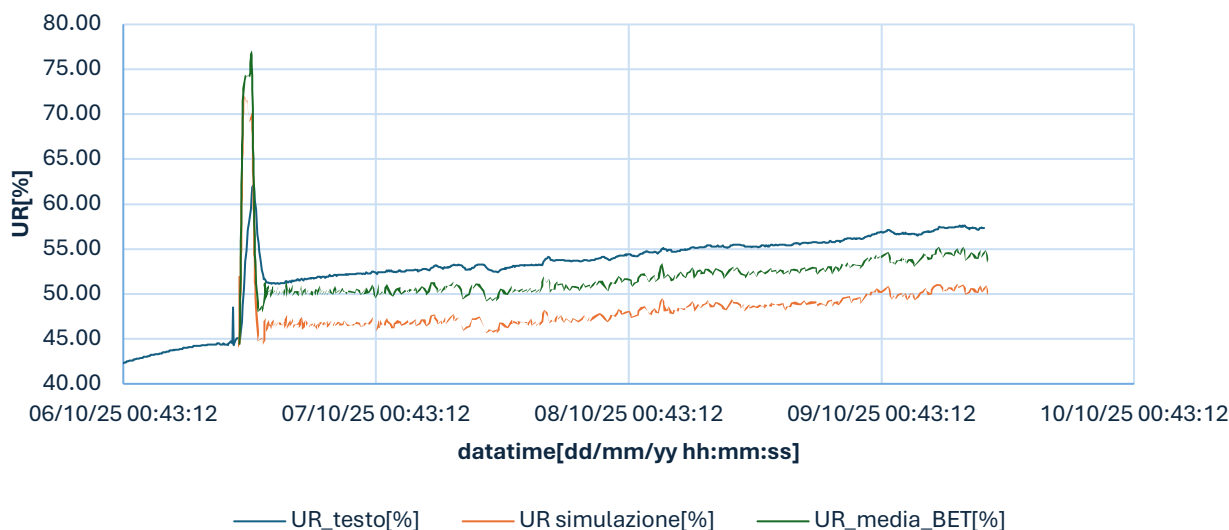


Figura 32-confronto tra i vari andamenti di UR ottenuti ed esterna

Come possibile notare, anche in questo caso la simulazione mostra un trend di UR analogo a quello reale della teca. Si osserva anche in questo caso uno scostamento, ma che può essere ritenuto accettabile.

### 4.2 Test 04/11/2025

Questo test è stato condotto al fine di determinare la causa della differenza tra l'umidità relativa dell'ambiente interno e quella dell'ambiente esterno, nonostante l'assenza di componenti attivi per il trattamento dell'umidità interna e l'apparente in assenza di materiali in grado di generare umidità.

Da questa premessa il set up sperimentale e le condizioni del test sono le seguenti.

#### 4.2.1 Set up sperimentale

La configurazione della teca è quella rappresentata nell'immagine allegata.



*Figura 33-configurazione della teca per il test*

Le condizioni predefinite per il test sono le seguenti:

- Durata del test: 24h
- Condizioni esterne: temperatura controllata a 25 gradi e UR del 30%
- Luci interne alla teca sempre accese
- Luci della BET spente

Per quanto riguarda la strumentazione utilizzata, in questo caso, avendo osservato in precedenza una differenza tra il sensore Testo e le termocoppie, si è scelto di raccogliere i dati solo con il sensore Testo, avendone reputato i valori misurati più accurati rispetto a quelli ottenuti con le termocoppie. Per quanto riguarda i dati provenienti dall'esterno della teca, e quindi interni alla BET, sono stati sempre considerati i valori di temperatura e umidità restituiti dai sensori della BET stessa.

## 4.2.2 Risultati ottenuti

Per analizzare i risultati ottenuti si parte osservando le condizioni al contorno, e, quindi, le condizioni interne alla BET.

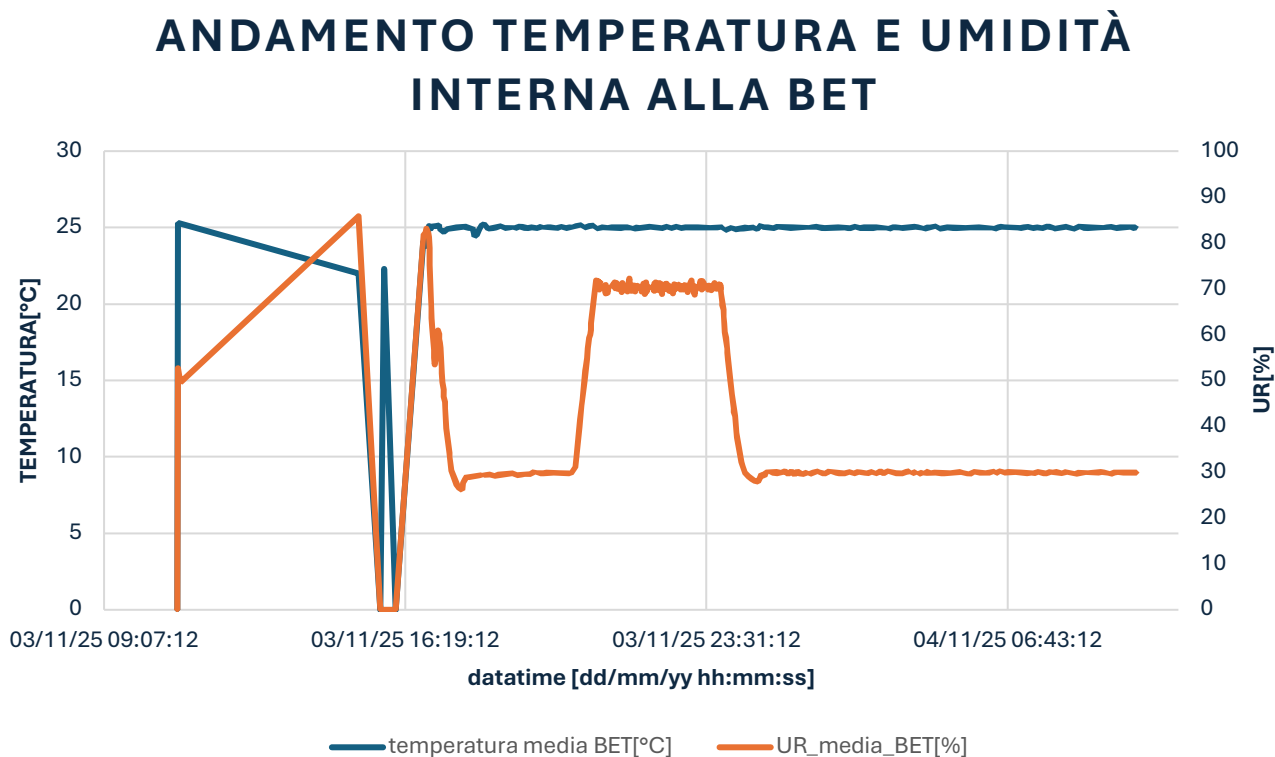


Figura 34-andamento delle condizioni interne alla BET

Si evidenzia che, in questo specifico caso, sia per la temperatura che per l'umidità relativa, si registrano valori che scendono a zero in determinati punti. Tali valori, pur non essendo reali, indicano che, in quei momenti, la camera climatica non stava esercitando il controllo sulla propria temperatura e umidità. Nonostante ciò, si è optato per la loro inclusione nel dominio del test al fine di preservare informazioni cruciali relative al transitorio e alle condizioni iniziali della BET e della teca. Alla luce di queste considerazioni, si può osservare il confronto tra gli andamenti di temperatura e umidità relativa sia all'interno che all'esterno della teca.

## CONFRONTO TRA TEMPERATURA DELLA BET E DELLA TECA

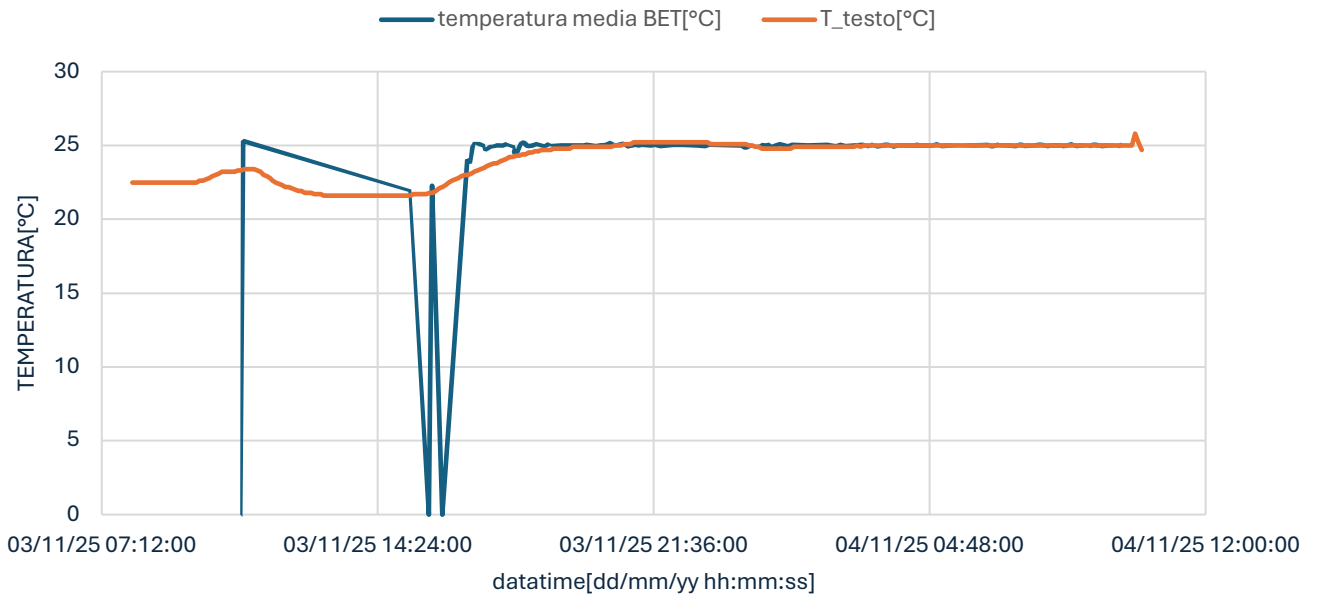


Figura 35-confronto tra gli andamenti di temperatura esterna ed interna alla teca

Come si può notare dal grafico allegato, escludendo il transitorio in cui la BET e la teca hanno un comportamento diverso, a regime presentano la temperatura praticamente coincidente.

Al fine di esaminare l'andamento dell'umidità relativa, si osserva il grafico allegato.

## ANDAMENTO UR DI BET E TESTO

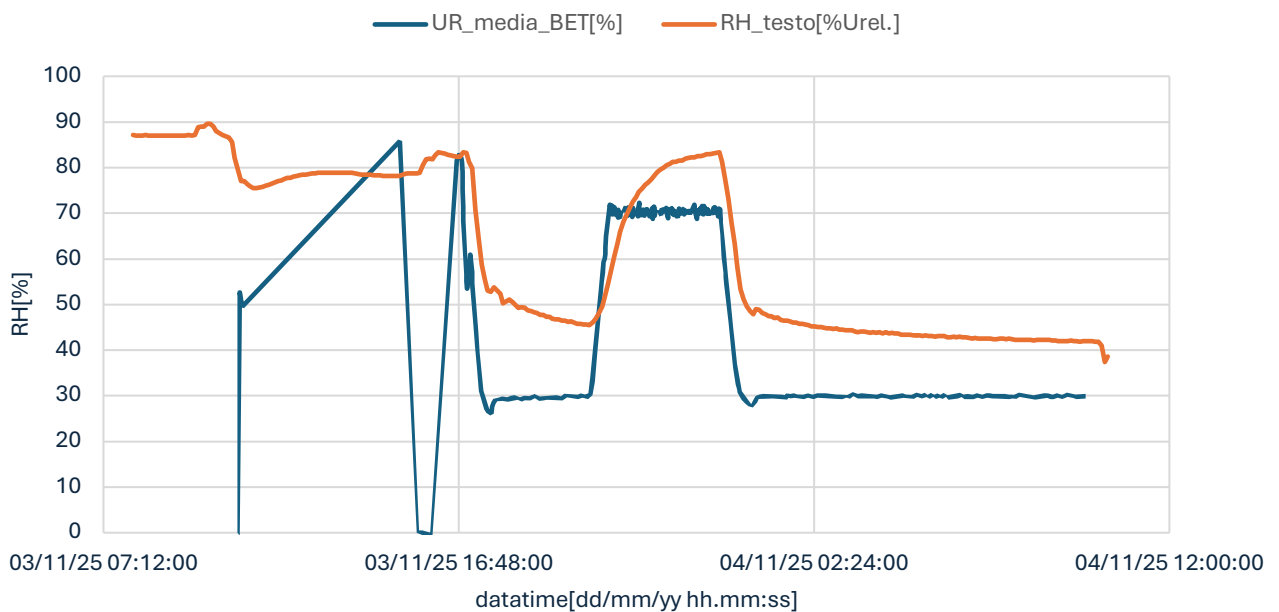


Figura 36-confronto tra gli andamenti di umidità relativa della BET e interna alla teca

Da questo grafico, si evince come strida in linea di principio che l'umidità relativa interna risulti essere maggiore per praticamente tutta la durata del test dell'umidità esterna, fisicamente impossibile dal momento in cui all'interno della teca non avrebbero dovuto esserci fonti in grado di generare umidità. Per questo motivo, si è scelto di analizzare anche la pressione di vapore interna ed esterna per accreditare ulteriormente l'ipotesi che ci fosse qualcosa che non andasse internamente alla vetrina che portasse una generazione di umidità.

Di seguito sono visibili gli andamenti di pressione di vapore interna ed esterna.

## ANDAMENTO PRESSIONE DI VAPORE

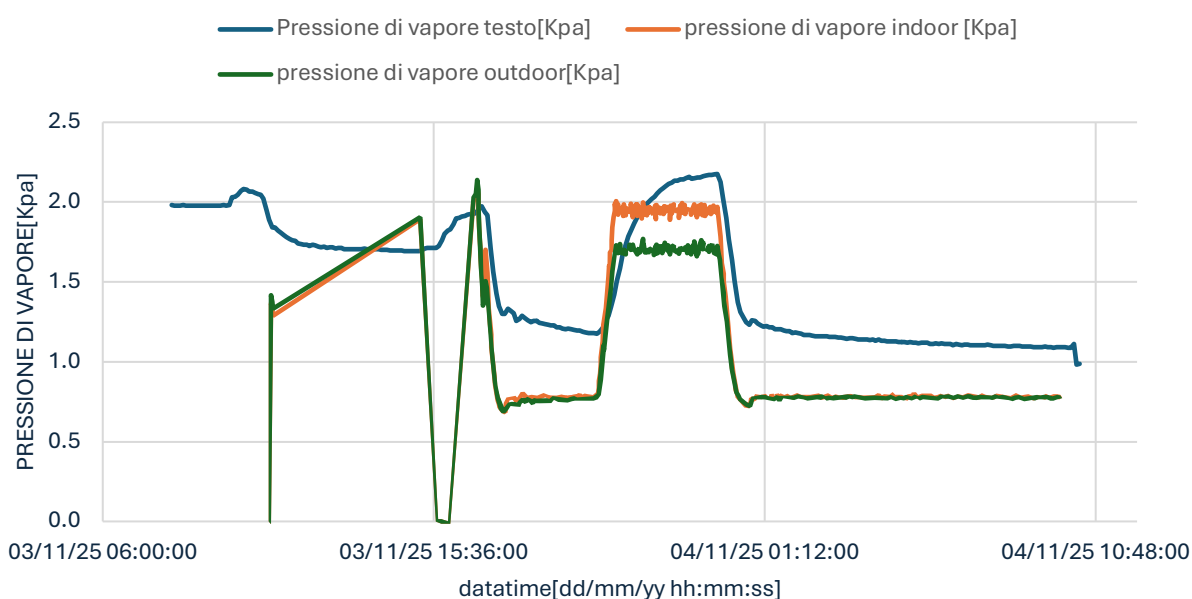


Figura 37-confronto tra gli andamenti di pressione di vapore interni alla BET e interni alla teca

Come si evince, anche andando a considerare la BET distinta tra la zona Indoor e Outdoor (la teca è fisicamente allocata nella parte Indoor), la pressione di vapore interna alla teca rimane comunque maggiore rispetto al suo esterno. Questo porta alla considerazione di due ipotesi che possono portare a questi andamenti:

- Un malfunzionamento del Testo e quindi delle letture di umidità sbagliate
- Rilascio di umidità da parte del pannello di legno utilizzato come base della vetrina

Per capire quale tra queste due possibilità sia la reale causa si è deciso di effettuare un altro test, utilizzando altri strumenti per confrontarli con quelli del termometro usato fino a questo momento.

## 4.3 Test del 18/11/2025

Il fine di questo test è stato quello di mettere in relazione i risultati ottenuti con il Testo, in particolare con altri sensori, per capire quale tra le due cause porta ad una pressione di vapore interna alla teca maggiore rispetto all'esterno. Il test non ha seguito gli andamenti di temperatura e umidità prestabiliti a causa di un malfunzionamento della BET, ma rimane ugualmente utile per il confronto delle misure dei vari sensori.

### 4.3.1 Strumentazione utilizzata

Per questo test, oltre al Testo utilizzato in tutti gli altri test, si è deciso di utilizzare un altro termometro dello stesso tipo, posizionato fuori dalla teca e altri sensori disponibili in laboratorio, chiamati TEBE II, TEBE III e TEBE V. Questi sensori sono in grado di misurare sia temperatura che umidità relativa e sono stati posizionati rispettivamente dentro la teca i sensori II e III, mentre fuori dalla teca il sensore numero V.

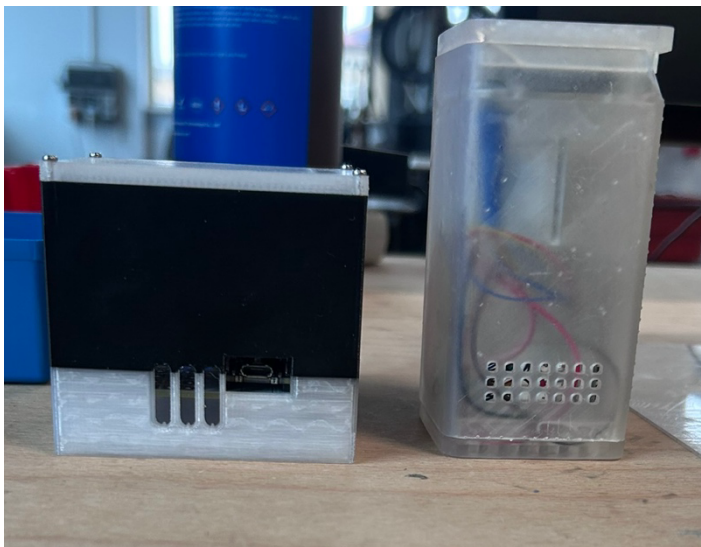


Figura 38-sensori TEBE II e TEBE V

### 4.3.2 Set-up sperimentale

Il set-up programmato per questo test era il seguente:

*Tabella 6- andamento di temperatura e umidità programmati per il test*

$T [^{\circ}\text{C}]$	UR [%]	Tempo rampa [min]	Tempo di stabilizzazione [h]
23	70	30	2.5
23	30	30	3
23	70	30	3
23	30	30	3

Come già detto in precedenza, a causa di un malfunzionamento della BET, le condizioni preimpostate non sono state rispettate, ma gli andamenti seguiti sono i seguenti:

## TEMPERATURA E UMIDITÀ INDOOR BET

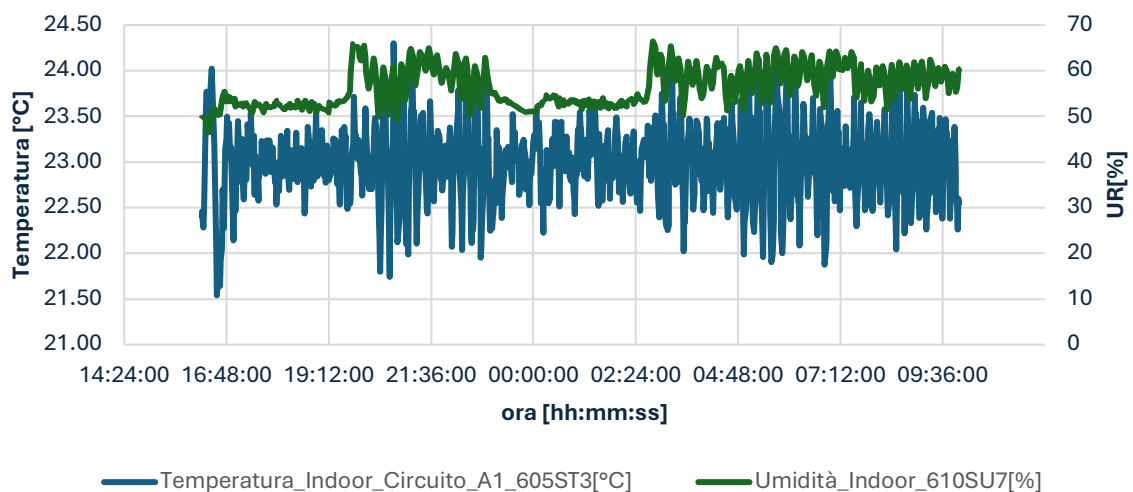


Figura 39-andamento temperatura e umidità indoor

## TEMPERATURA OUTDOOR BET

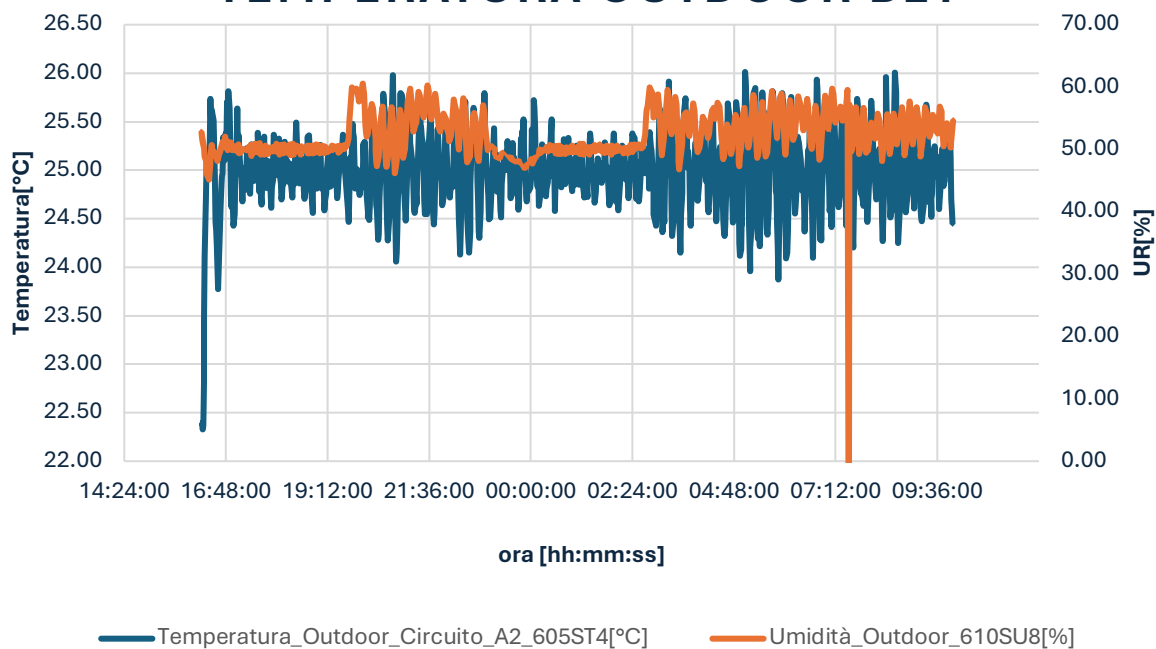


Figura 40-andamento temperatura e umidità outdoor

### 4.3.2 Risultati ottenuti

Con le condizioni esterne messe in evidenza in precedenza sono stati ottenuti i seguenti andamenti di temperatura e umidità per i vari sensori:

## T E UR TESTO3 (DENTRO LA TECA)

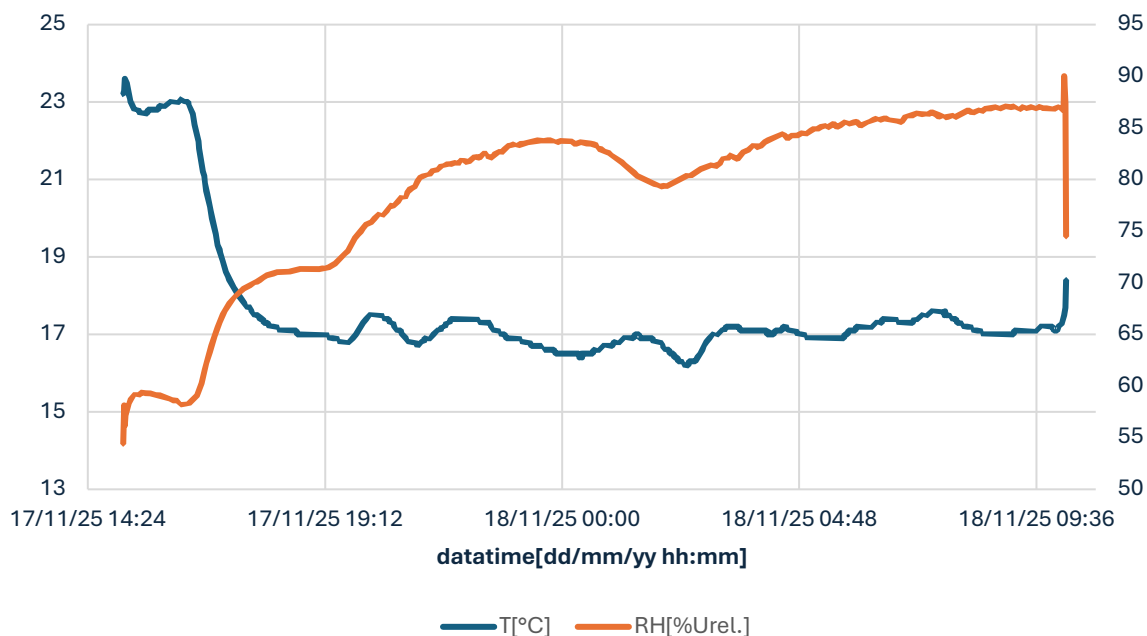


Figura 41-andamento temperatura e umidità testo 3

## T E UR TESTO 4(FUORI LA TECA)

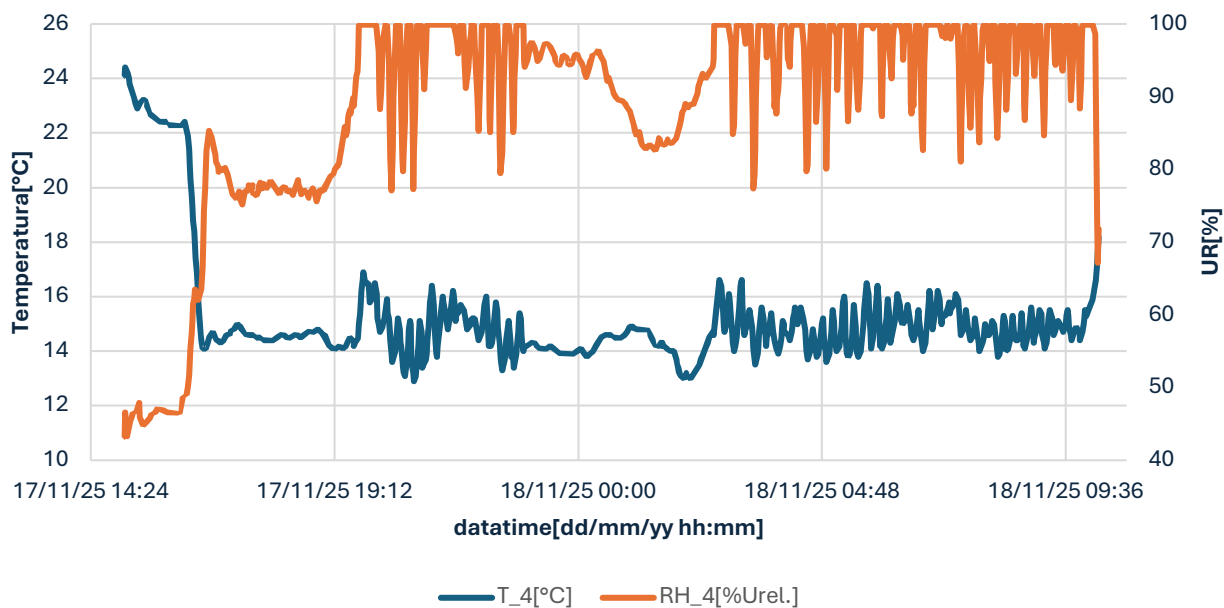


Figura 42-andamento temperatura e umidità testo 4

## T E UR TEBE II(DENTRO LA TECA)

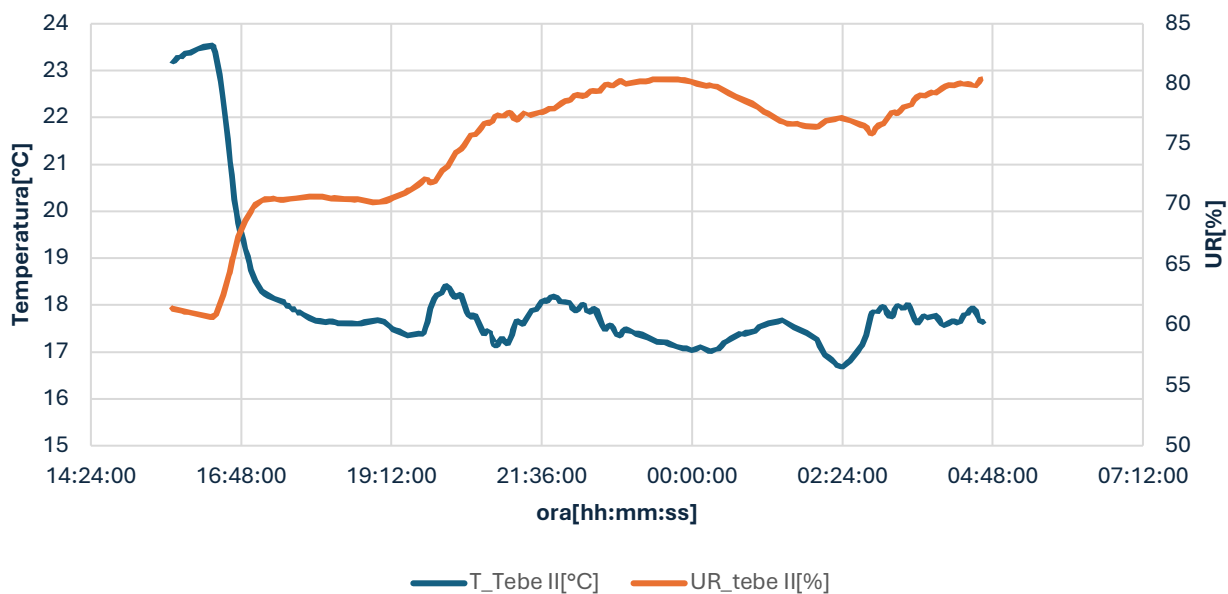


Figura 43- andamento temperatura e umidità relativa TEBE II

## T E UR TEBE III(DENTRO LA TECA)

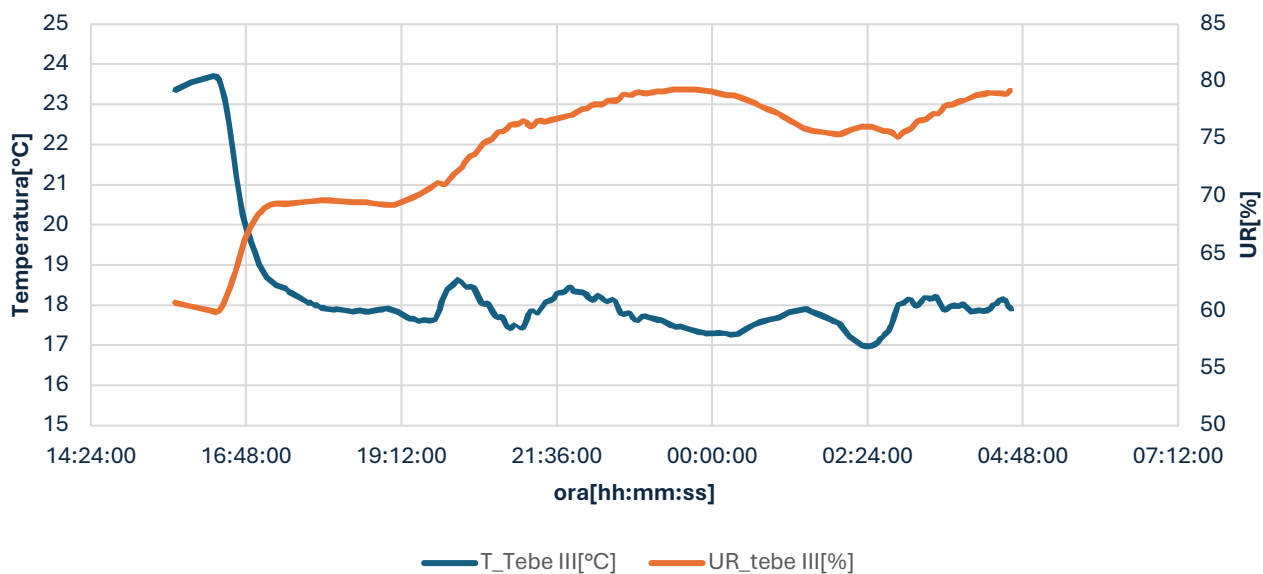


Figura 44-andamento temperatura e umidità relativa TEBE III

## T E UR TEBE V(FUORI LA TECA)

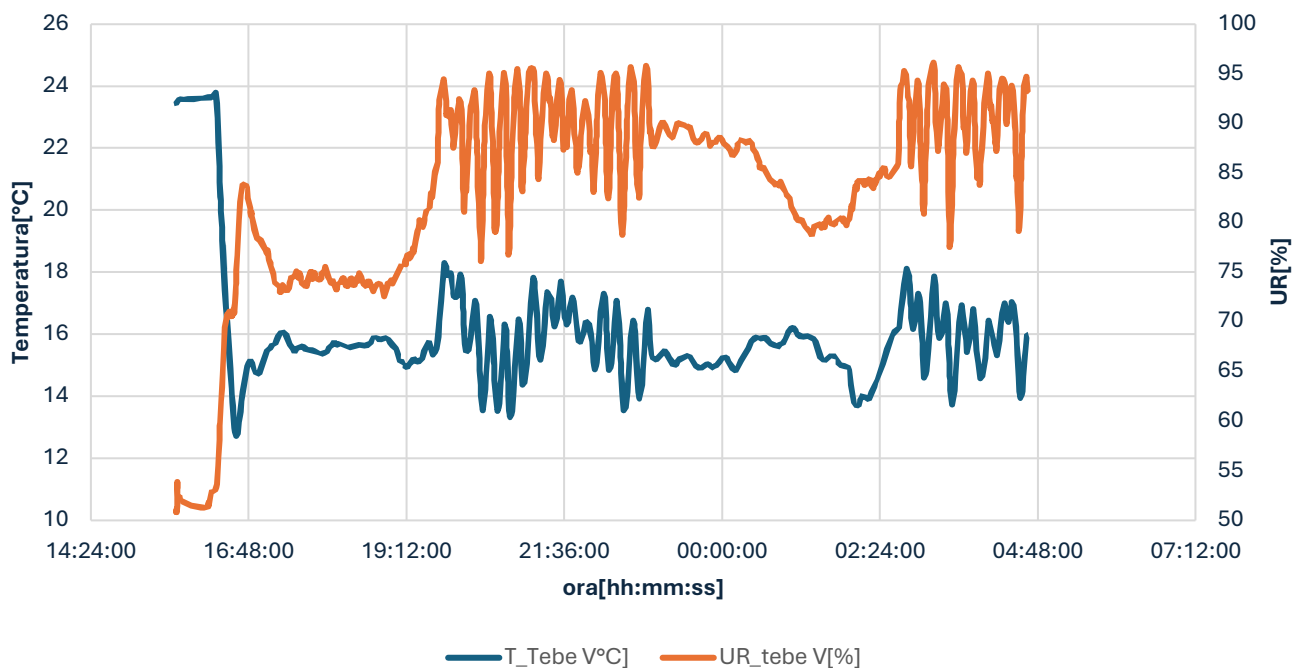


Figura 45-andamenti temperatura e umidità relativa TEBE V

L'analisi dei grafici evidenzia che i sensori presentano andamenti simili; tuttavia, non consentono di determinare con certezza l'eventuale rilascio di umidità all'interno della teca. Pur non rispettando le condizioni prestabilite, il test risulta comunque prezioso per valutare la probabilità che i sensori precedentemente impiegati non abbiano fornito dati errati.

## 4.4 Test del 19/11/2025

L'obiettivo di questo test era stabilire la presenza di una generazione di umidità interna attribuibile al pannello di legno contenuto nella teca. A tal fine, è stato programmato un test alternativo, di durata inferiore rispetto a quello previsto per il 18 novembre 2025, ma sufficientemente lungo da consentire l'osservazione di eventuali variazioni nella pressione di vapore e, conseguentemente, nell'umidità relativa interna rispetto all'ambiente esterno.

### 4.4.1 Setup e strumentazione utilizzata

Per la conduzione di questo test sono stati impiegati gli stessi sensori utilizzati nella precedente valutazione, ovvero i due sensori Testo 174H, designati rispettivamente Testo 3, il termometro collocato all'interno della teca, e Testo 4, quello posizionato esternamente. Inoltre, sono stati utilizzati i sensori TEBE II, TEBE III e TEBE V, disposti rispettivamente all'interno dei primi due sensori, e il sensore numero cinque, posizionato all'esterno. Le altre condizioni del test sono riassunte nella tabella seguente.

*Tabella 7-condizioni esterne programmate per il test e posizione dei sensori*

Condizioni esterne	
<b>Temperatura [°C]</b>	23
<b>Umidità relativa [%]</b>	Andamento sinusoidale tra 70 e 30
<b>Durata del test [h]</b>	17
<b>illuminazione</b>	Luci BET spente, luci interne accese
<b>Sensori interni alla teca</b>	Testo 3, TEBE II e TEBE III
<b>Sensori esterni alla teca</b>	Testo 4 e TEBE V

Da queste condizioni di partenza sono stati ottenuti i risultati che verranno evidenziati nel paragrafo seguente.

#### 4.4.2 Risultati ottenuti

Partendo dai dati della Tabella 6, sono stati ottenuti i seguenti andamenti di temperatura e umidità relativa all'interno della BET.

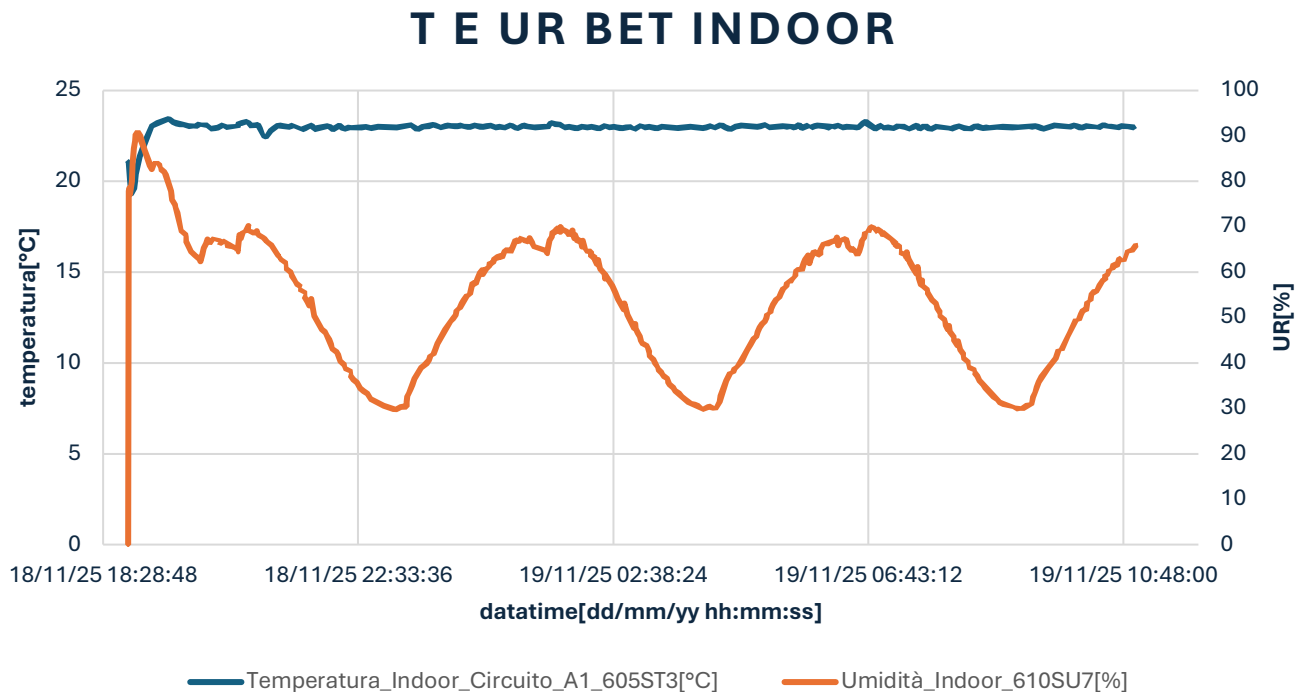


Figura 46-andamento di temperatura e umidità relativa BET indoor

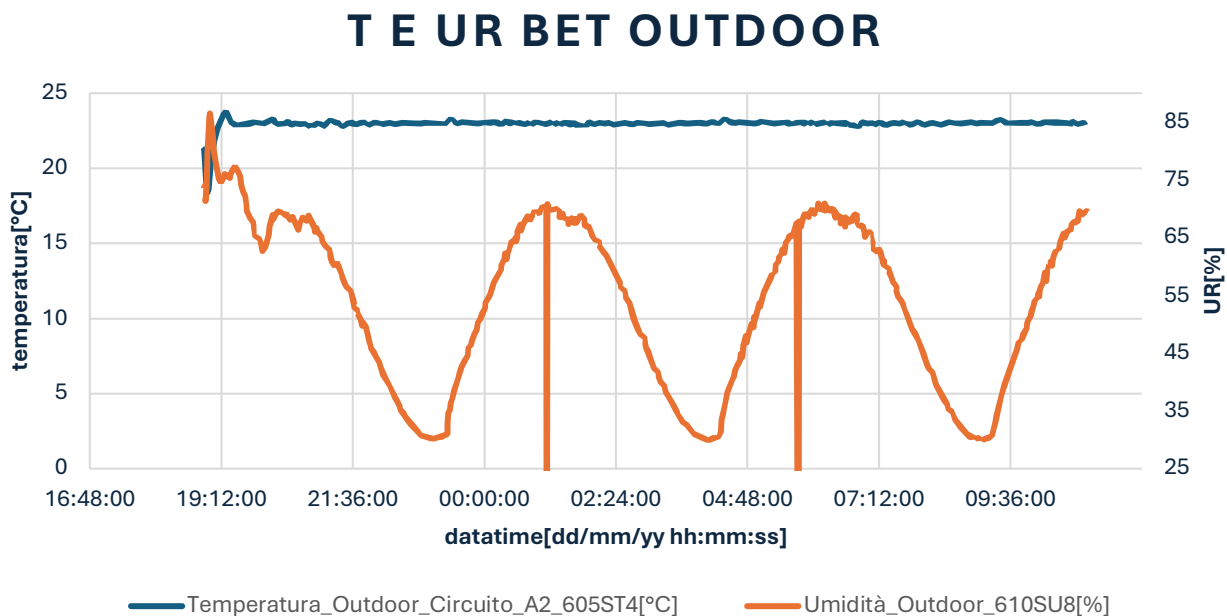


Figura 47-andamento temperatura e umidità relativa BET outdoor

In questo caso, quello che si nota è che a differenza del test precedente, l'andamento interno alla BET segue abbastanza accuratamente l'andamento programmato.

Da queste condizioni esterne sono stati ottenuti i seguenti risultati.

## ANDAMENTI DI TEMPERATURA DEI VARI SENSORI

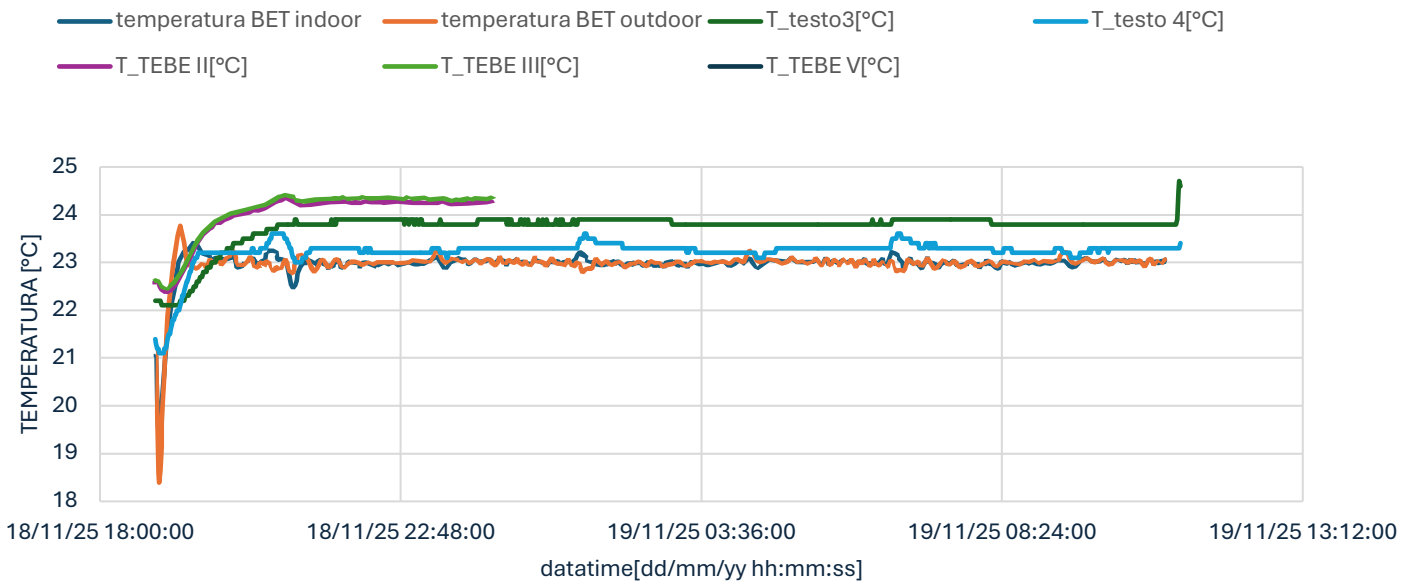
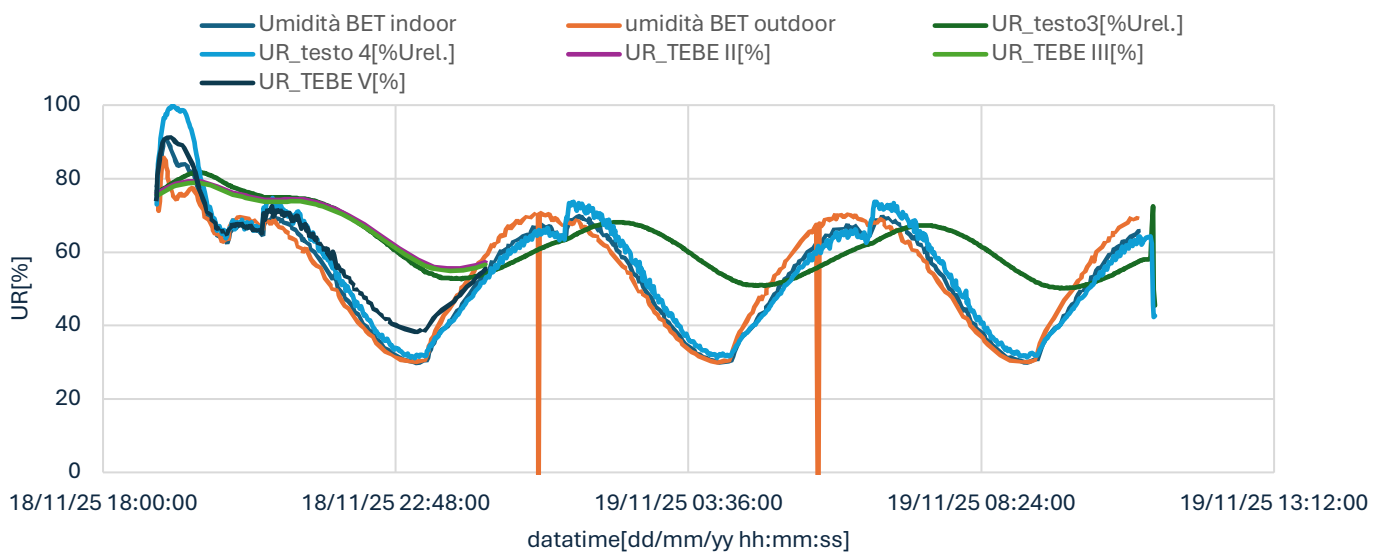


Figura 48-andamenti temperatura dei vari sensori

Quello che si nota nell'andamento di temperatura dei vari sensori è che seguono le condizioni esterne (la temperatura risulta comunque maggiore a causa delle illuminazioni interne). Andando però ad osservare l'andamento dell'umidità relativa, che è il vero fulcro di questo test possiamo osservare:

Figura 49-andamenti umidità relativa dei vari sensori

## ANDAMENTI DI TEMPERATURA DEI VARI SENSORI



Come si evince da questo grafico, l'umidità relativa interna alla teca risulta avere un comportamento particolare nella maggior parte della durata del test rispetto a quella esterna. Di fatto, si può notare come internamente l'umidità è maggiore rispetto a quella esterna per umidità esterna bassa, in particolare quando raggiunge il 30% come previsto dal ciclo sinusoidale impostato, ed è minore quando il ciclo raggiunge il 70%. Questo comportamento, tipico di un materiale igroscopico, suggerisce che il pannello di legno presente all'interno della teca risentisse delle variazioni di umidità e tendesse a rilasciare e assorbire umidità durante i vari test. A conferma di ciò è opportuno osservare l'andamento della pressione di vapore per i vari sensori.

## PRESSIONE DI VAPORE BET INDOOR E OUTDOOR

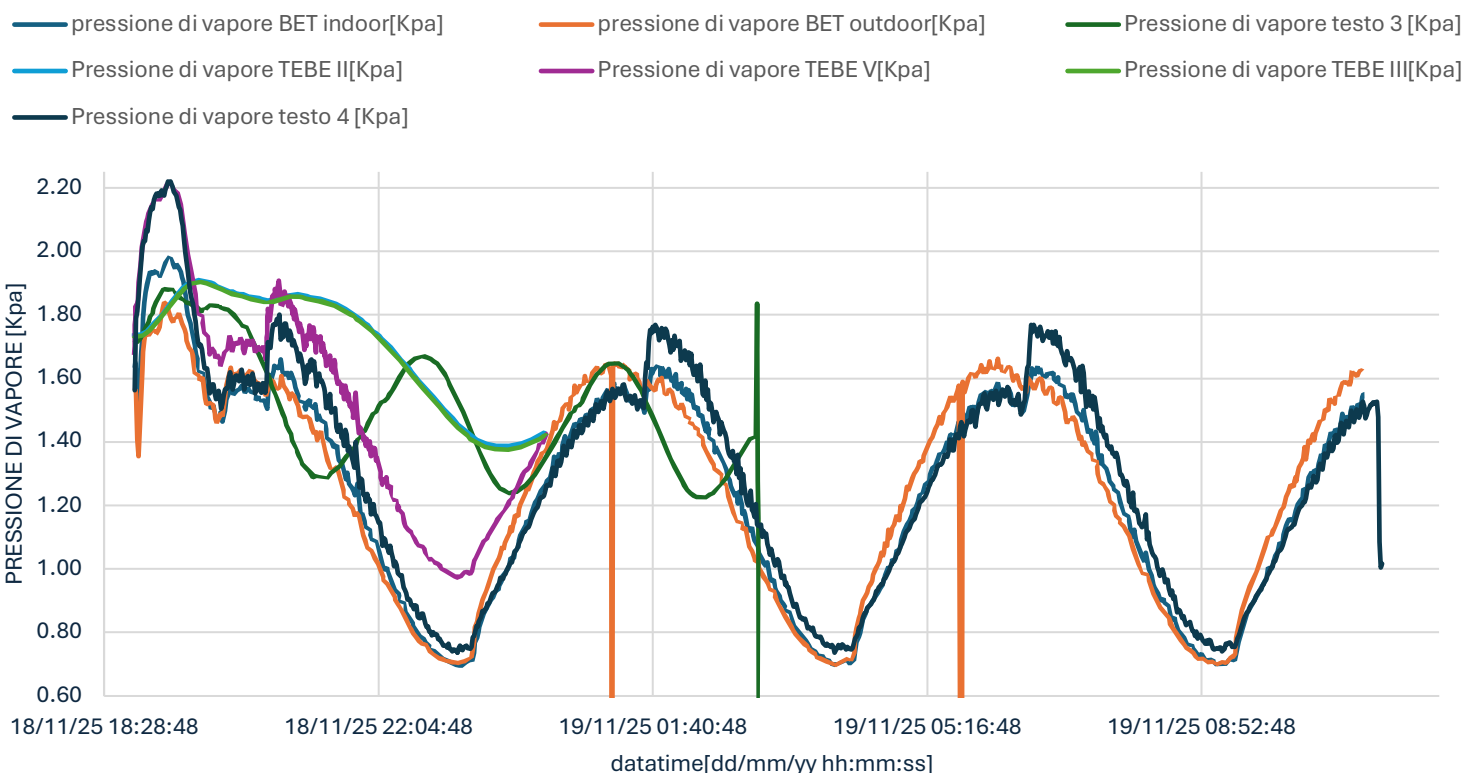


Figura 50- andamenti delle pressioni di vapore dei vari sensori

Anche in questo caso, si fanno le stesse considerazioni precedentemente esposte per l'umidità relativa. La risposta definitiva è che la base in legno interferisce nei test a causa delle sue proprietà igroscopiche.

La soluzione a questo problema si è trovata andando a coprire il pannello stesso tramite uno strato di nylon in grado di fare da barriera e non permettere al vapore rilasciato dal legno di entrare all'interno del vano della vetrina.

## 5. PROVA DI CONTROLLO PASSIVO DELL'UMIDITÀ DELLA TECA

In questo capitolo verrà spiegato come sia stato prodotto il materiale igroscopico da inserire all'interno della teca per il controllo passivo dell'umidità della teca.

### 5.1 Preparazione del materiale igroscopico

Un materiale igroscopico si definisce come un materiale in grado di assorbire e rilasciare umidità fino a raggiungere l'equilibrio con l'ambiente circostante. I materiali tipicamente igroscopici sono:

- Sali;
- Composti organici come zucchero, cotone, carta e legno;
- Composti argillosi.

In questo specifico caso, si è scelto di procedere con la preparazione di un composto argilloso. La composizione chimica scelta è la seguente:

- Bentonite, un composto sabbioso proveniente da roccia argillosa, al 49%;
- Alginato di sodio, un sale sodico derivante dalle alghe brune, al 2%;
- Acqua distillata il restante 49%.

La bentonite è un materiale con proprietà igroscopiche note [27-28], stampabile in 3D, ma che manca di stabilità strutturale. Per questo motivo, si sceglie di includere l'alginato di sodio, preso dalle alghe, in modo che a seguito di reticolazione nella soluzione di cloruro di calcio, possa rendere la struttura stabile. L'acqua viene fondamentalemente utilizzata per la creazione dell'impasto e per l'amalgamazione di bentonite e alginato. A tutti gli effetti è ciò che permette di avere una struttura solida e non sabbiosa nel composto finale.



*Figura 51-composto dopo aver creato l'impasto*

Una volta ottenuto questo impasto, ci si è posti il problema di dare omogeneità al composto e per fare ciò è stato necessario di raffinare l'impasto, grazie all'uso di una raffinatrice, andandolo a rendere più omogeneo e quindi migliore sia dal punto di vista della lavorabilità che dal punto di vista dell'igroscopicità.



*Figura 52-composto mentre viene raffinato con la raffinatrice*

Una volta ottenuto un composto omogeneo, è stato possibile stampare in 3D dei blocchi di composto argilloso. La forma dei pannelli scelta è la FischerKosch 5x5x2. La forma non è

casuale, ma deriva da degli studi di natura edilizia da parte di Fischer e Kosch su materiali edili e igroscopici. Questa particolare configurazione conferisce stabilità meccanica, un'asciugatura uniforme e che non richieda troppo tempo e, infine, come caratteristica più importante garantisce una capacità igrometrica elevata, avendo un rapporto tra superficie e volume elevato.



*Figura 53- pannello post stampa*

Una volta stampati, ogni pannello è stato immerso in una soluzione reticolante. La soluzione ha la seguente composizione:

- 20% in massa di cloruro di calcio ( $\text{CaCl}_2$ );
- 80% in massa di acqua.

Mettere a polimerizzare un composto argilloso di questo tipo ha uno scopo ben preciso. Immergere l'impasto di argilla e alginato in una soluzione di cloruro di calcio permette agli ioni  $\text{Ca}^{2+}$  di trasformare l'alginato di sodio in alginato di calcio, creando un gel stabile che mantiene la forma del pannello e rende il materiale più resistente e meno sensibile all'acqua. Il tempo di reticolazione post stampa utilizzato è stato di 72 ore. In questo intervallo di tempo, il pannello rilascia dell'acqua presente nell'impasto iniziale e sostituisce il sodio presente nell'alginato con il calcio, come spiegato in precedenza.

Una volta ottenuto un pannello della forma desiderata e polimerizzato, questo necessita solo di essere essiccato per poter procedere al pre-condizionamento e ai test da effettuare. Nel grafico seguente, si potrà osservare l'andamento delle masse dei due pannelli stampati dal post-reticolazione fino all'essiccazione completa.

## ANDAMENTO MASSE DEI DUE PANNELLI POST RETICOLAZIONE

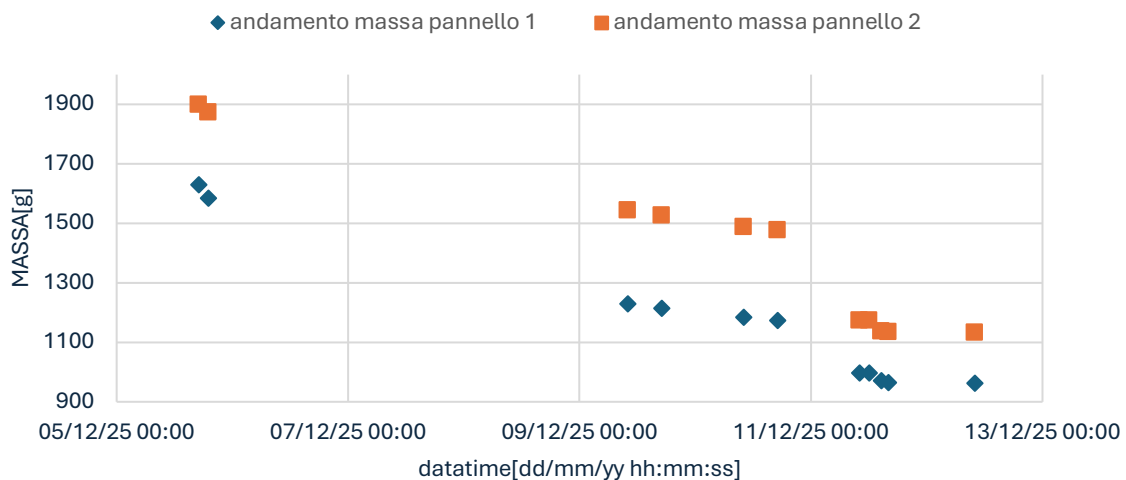


Figura 54- andamento delle masse dei pannelli durante l'essiccazione

Una volta essiccati i pannelli sono stati preconditionati al 50% di umidità relativa in camera climatica così da renderli definitivamente pronti per la loro applicazione.

### 5.2 Caratterizzazione dei materiali igroscopici

Per capire al meglio il comportamento dei materiali igroscopici e la loro capacità di assorbimento, è stata effettuata un'analisi di vari materiali igroscopici partendo dalla loro curva isoterma di adsorbimento al fine di determinare:

- Capacità di assorbimento specifico (seguendo il bollettino tecnico 33 del Canada Conservation Institute)
- Derivata dell'assorbimento in funzione dei vari livelli di umidità relativa
- Quantità in massa di materiale tampone da inserire nella teca del laboratorio e in una teca ideale a più alta tenuta

Per fare ciò, si parte dalle seguenti curve di adsorbimento:

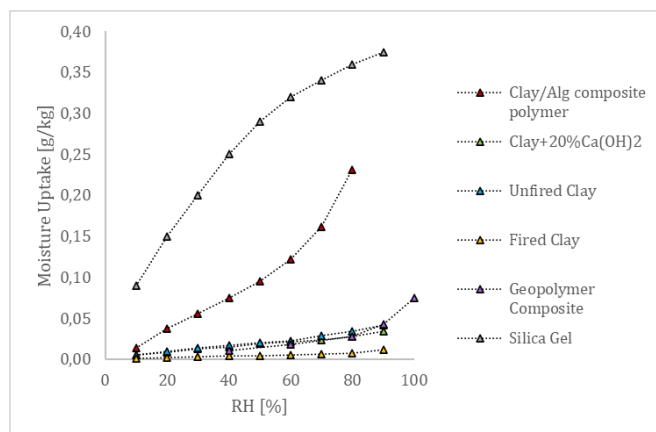


Figura 55-curve di adsorbimento dei diversi materiali tampone

Partendo da questi dati, il calcolo della capacità di assorbimento specifico viene calcolata come [14]:

$$M_H = \frac{w(75\%) - w(33\%)}{0.75 - 0.33} \quad \left[ \frac{g}{kg} \right]$$

Dove:

- $w(75\%)$  è il quantitativo di acqua assorbito per umidità relativa pari al 75% su chilogrammo di materiale secco;
- $w(33\%)$  è il quantitativo di acqua assorbito per umidità relativa pari al 33% su chilogrammo di materiale secco.

I valori di assorbimento specifico ottenuti per i vari materiali sono i seguenti:

Tabella 8-capacità di assorbimento specifico dei vari materiali tampone

materiale	$M_H$ [g/kg]
<b>Geopolimero</b>	1.16
<b>Clay/Al</b>	1.06
<b>Clay20%Ca(OH)2</b>	0.99
<b>Argilla cruda</b>	0.85
<b>Argilla cotta</b>	0.63
<b>Silica gel</b>	0.92

Una volta calcolata la capacità di assorbimento, è stata calcolata la derivata delle curve per andare a visualizzare come cambia la capacità di assorbimento in funzione delle condizioni di umidità. L'equazione utilizzata è la seguente [14]:

$$\frac{dw(UR)}{dUR} \approx \frac{\Delta w}{\Delta UR} = \frac{m_u}{\Delta UR} \left[ \frac{g}{kg} \Delta UR \text{ dell'1\%} \right]$$

Dove:

- $m_u$  è proprio il moisture uptake rappresentato nella curva, ovvero la quantità d'acqua assorbita tra condizioni diverse di umidità relativa

L'andamento della derivata è sintetizzato nella seguente tabella e visualizzato nel grafico successivo.

Tabella 9-valore derivate per diversi valori di UR

## ANDAMENTO DELLE DERIVATE PER I MATERIALI TAMPONE

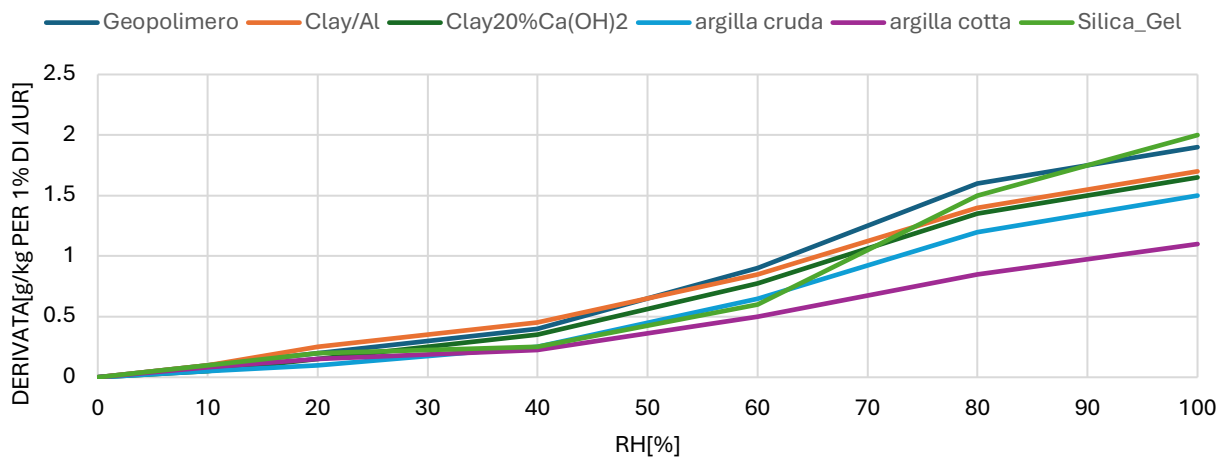


Figura 56- andamento della derivata per i diversi materiali tampone

UR	Geopolimero	Clay/Al	Clay20%Ca(OH)2	Argilla cruda	Argilla cotta	Silica Gel
0	0	0	0	0	0	0
10	0.10	0.10	0.05	0.05	0.08	0.10
20	0.20	0.25	0.15	0.10	0.15	0.20
40	0.40	0.45	0.35	0.25	0.23	0.25
60	0.90	0.85	0.78	0.65	0.50	0.60

<b>80</b>	1.60	1.40	1.35	1.20	0.85	1.50
<b>100</b>	1.90	1.70	1.65	1.50	1.10	2.00
<b>derivata media</b>	1.00	0.93	0.86	0.74	0.57	0.91

### 5.2.1 Calcolo della quantità di materiale tampone necessario per la teca

Una volta calcolati questi parametri per questi materiali tampone, si è scelto di calcolare la quantità di materiale tampone da inserire nella teca per mantenere le condizioni desiderate per un numero di giorni prestabilito. L'equazione che permette questo calcolo è sempre fornita dal bollettino tecnico 33 del CCI ed è la seguente [14]:

$$Q = \frac{C_{eq}DVNt}{M_H F} \quad [kg]$$

Dove:

- Q è la quantità raccomandata di sorbente secco [kg]
- $C_{eq}$  è la concentrazione di vapore acqueo all'equilibrio [ $g/m^3$ ]
- D è la differenza decimale tra interno ed esterno [-]
- V è il volume netto della teca [ $m^3$ ]
- N è il tasso di ricambi giornalieri [1/day]
- t è il numero minimo di giorni di cui si vuole garantire l'umidità target[day]
- $M_H$  è la capacità di assorbimento specifico [g/kg]
- F è il range di fluttuazione target dell'umidità [%]

In questo specifico caso i dati noti sono i seguenti:

- $V = 0.524 \text{ m}^3$
- $N = 12.24 \text{ 1/day}$
- $F = 10\%$  (non è un dato noto, ma è stato scelto come valore per questo calcolo)

Per quanto riguarda, invece, la  $C_{eq}$  è stata calcolata seguendo sempre il TB 33 del CCI con la seguente equazione [14]:

$$C_{eq} = 7.36e^{\frac{T}{19.96}} - 2.75. \quad \left[\frac{g}{m^3}\right]$$

Da questa equazione otteniamo:

- $T = 23^{\circ}\text{C}$
- $C_{eq} = 20.55 \text{ g/m}^3$

Una volta definiti tutti i valori noti, è stata effettuata un'analisi multivariata, andando a valutare la quantità di materiale tampone in funzione del numero di giorni e della D. I risultati ottenuti possono essere visualizzati nei seguenti grafici per ogni materiale tampone.

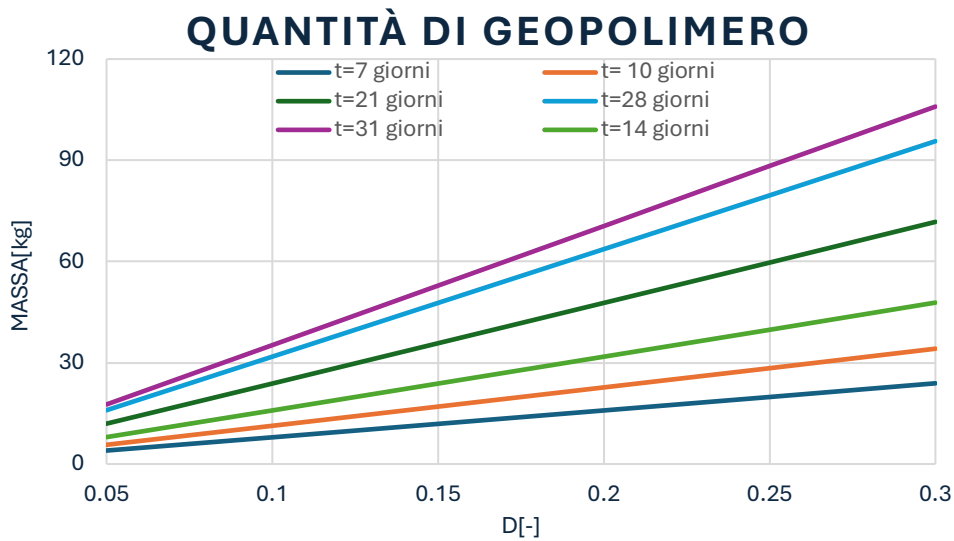


Figura 57-andamento quantità di geopolimero richiesto per le diverse condizioni di D e di t nella teca

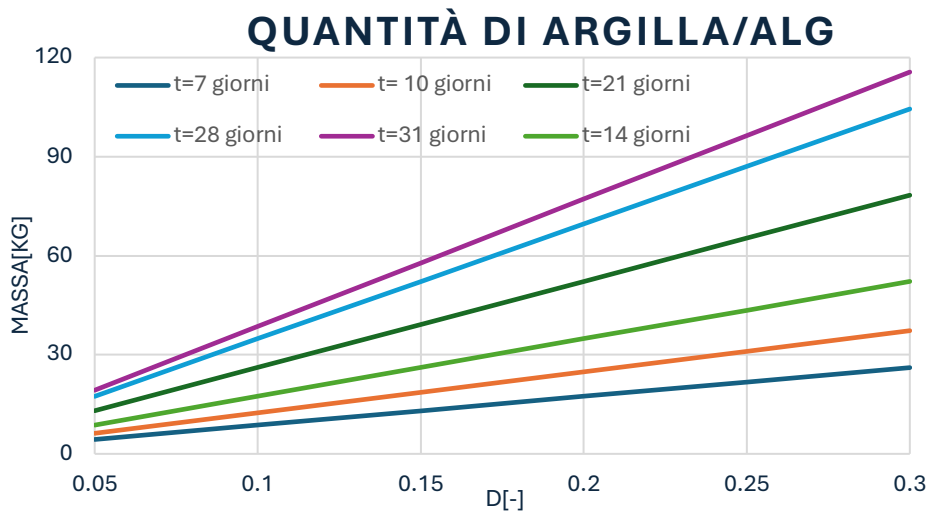


Figura 58-andamento quantità di argilla/alg richiesto per le diverse condizioni di D e di t per la teca

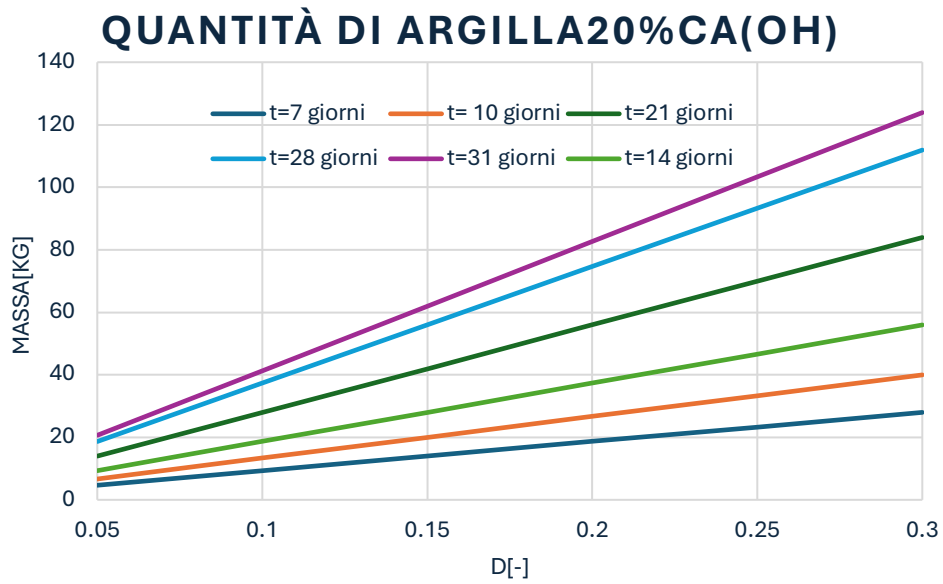


Figura 59-andamento quantità di argilla 20Ca(OH) richiesto per le diverse condizioni di D e di t per la teca

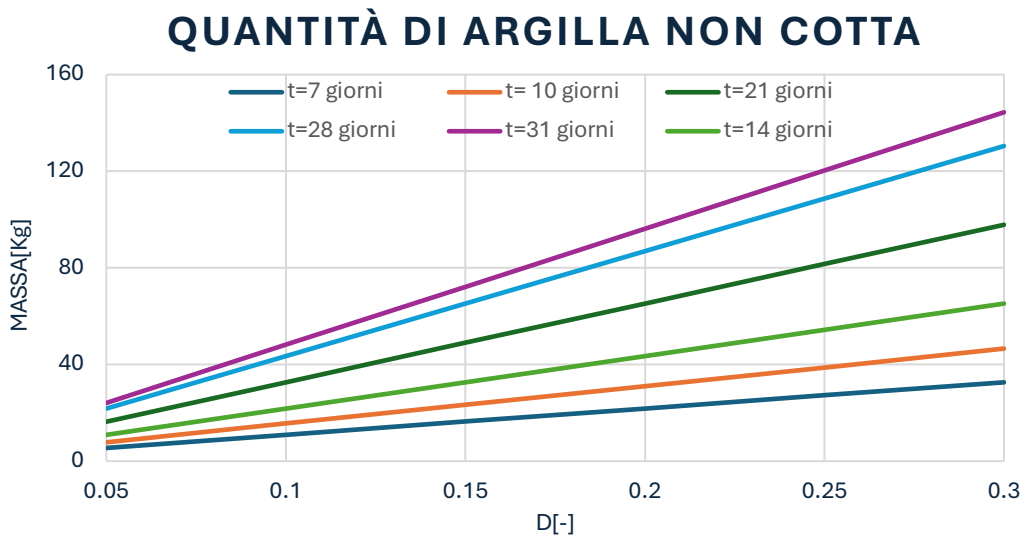


Figura 60-andamento quantità di argilla non cotta richiesto per le diverse condizioni di D e di t per la teca

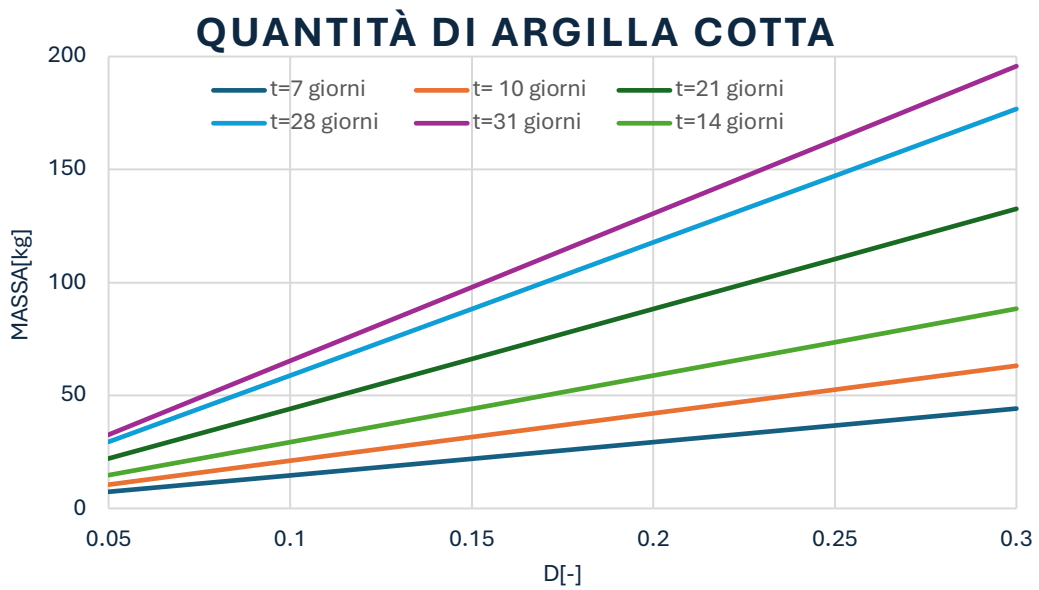


Figura 61-andamento quantità di argilla cotta richiesto per le diverse condizioni di D e di t per la teca

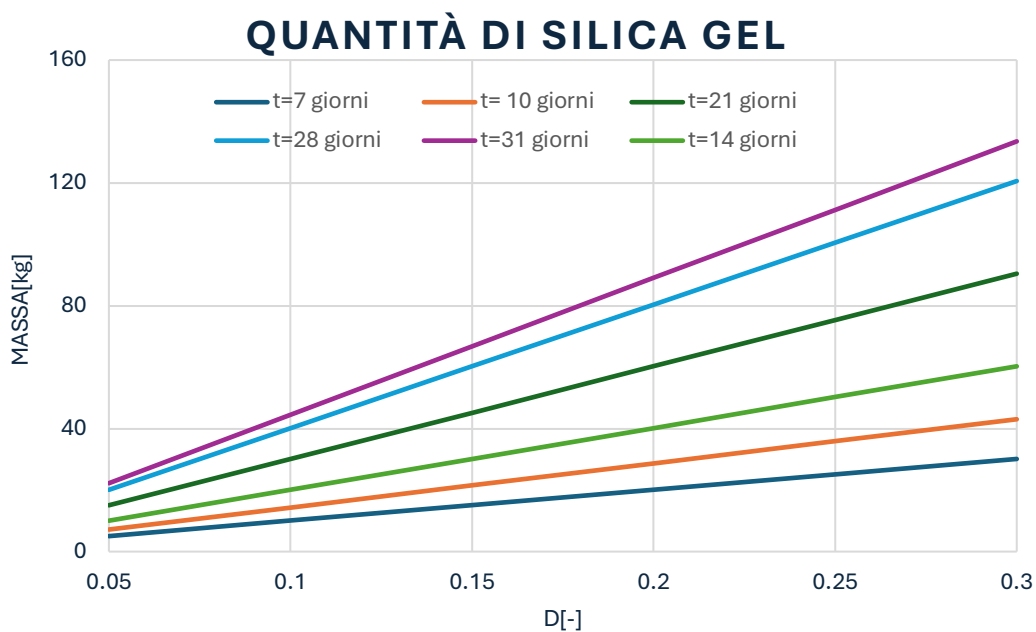


Figura 62-andamento quantità di silica gel richiesto per le diverse condizioni di D e di t per la teca

Come si evince da questi grafici, la quantità di materiale tampone richiesto per il mantenimento dell'umidità relativa nei range desiderati è al quanto ingente. Il principale colpevole di questi risultati è sicuramente il tasso di ricambi orari, in quanto molto elevato per poterlo considerare attendibile per una teca reale. Per questo motivo, per dare all'analisi sui materiali tampone anche un'applicazione realistica, si è scelto di effettuare lo stesso calcolo anche con un valore di N più realistico.

#### 5.2.2 Calcolo della quantità di materiale tampone per $N = 0.5$ 1/day

I valori noti usati per questo calcolo sono gli stessi utilizzati per il calcolo effettuato per la teca del laboratorio, mentre il tasso di ricambi d'aria, si è scelto di utilizzare  $N = 0.5$  1/day, considerandolo come valore ottimale per una teca reale. Da questi dati sono stati ottenuti i seguenti risultati seguendo lo stesso tipo di analisi multivariata effettuata precedentemente.

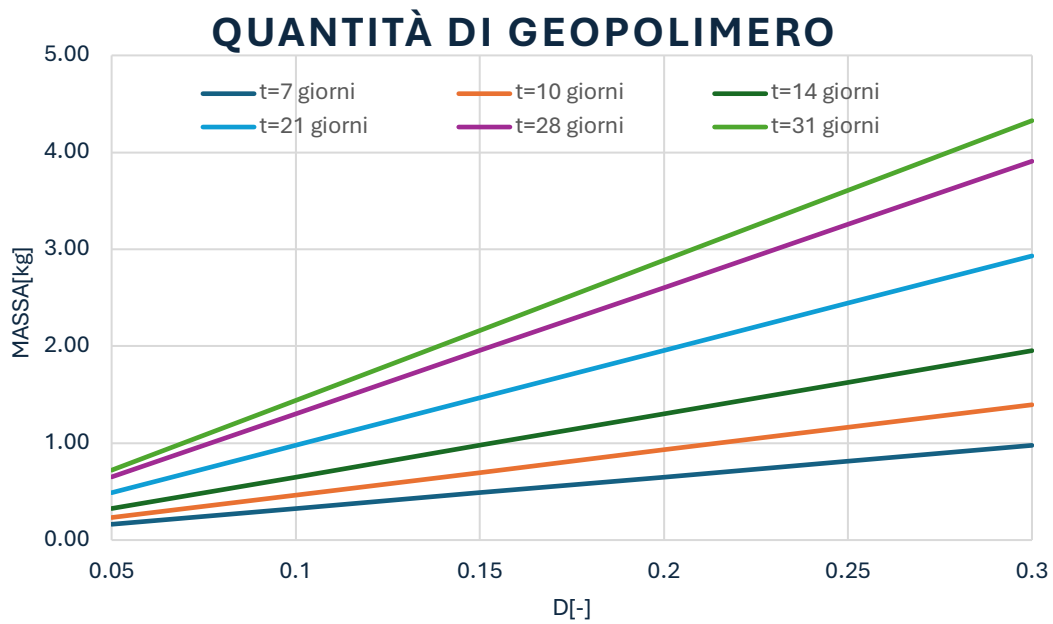


Figura 63-andamento quantità di geopolimero richiesto per le diverse condizioni di D e di t per N=0.5 1/day

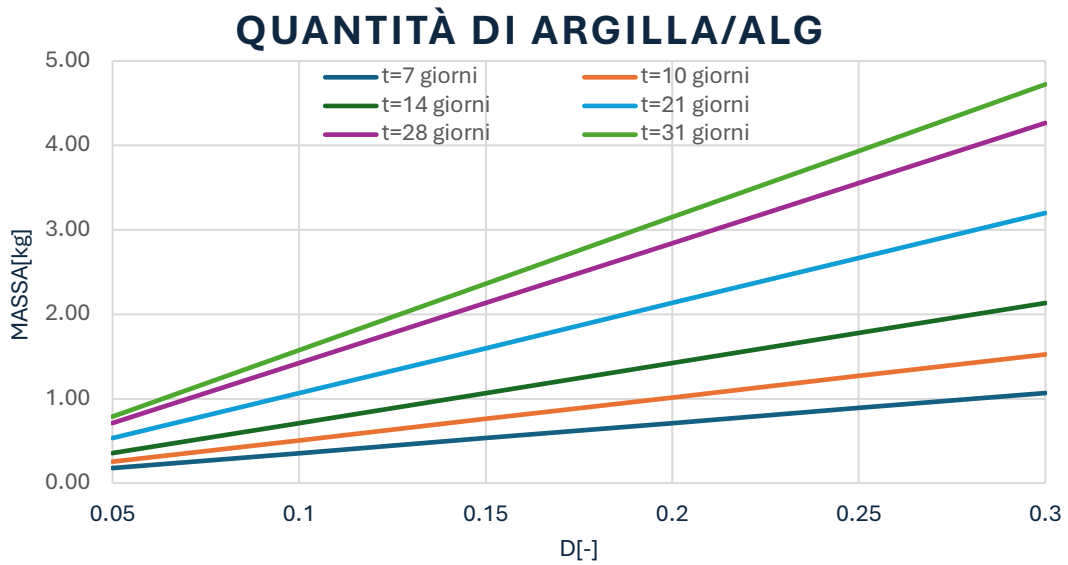


Figura 64-andamento quantità di argilla/alg richiesto per le diverse condizioni di D e di t per N=0.5 1/day

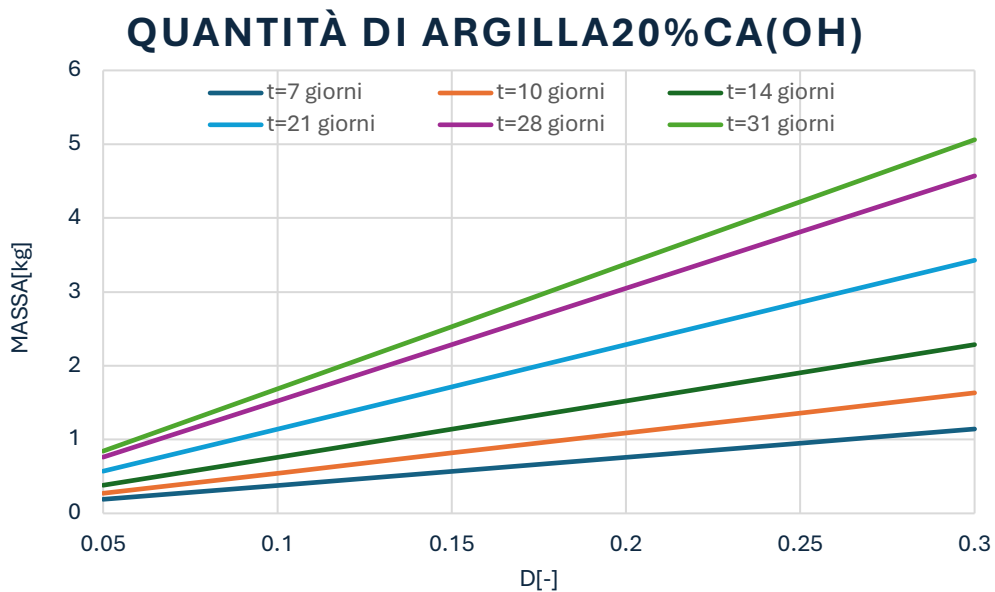


Figura 65-andamento quantità di argilla20%Ca(OH) richiesto per le diverse condizioni di D e di t per N=0.5 1/day

### QUANTITÀ DI ARGILLA NON COTTA

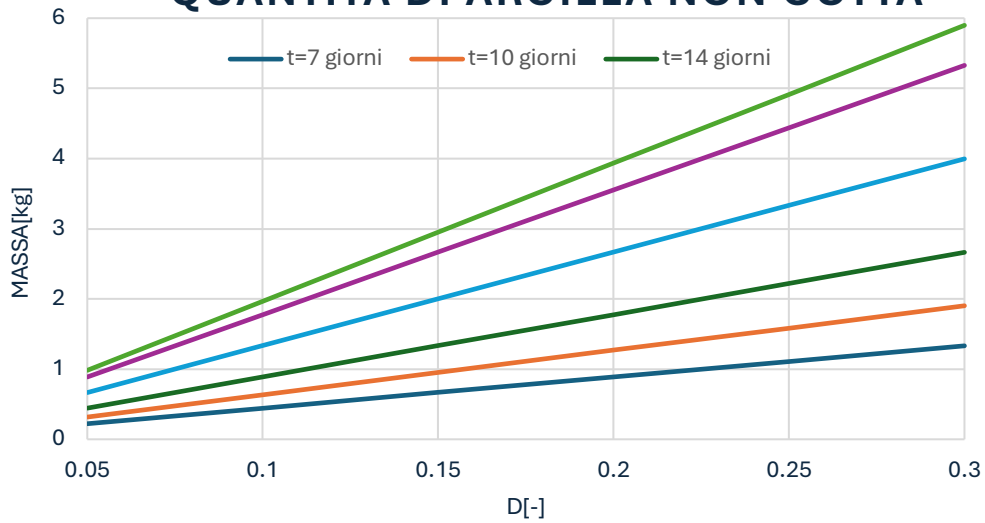


Figura 66-andamento quantità di argilla non cotta richiesto per le diverse condizioni di D e di t per N=0.5 1/day

### QUANTITÀ DI ARGILLA COTTA

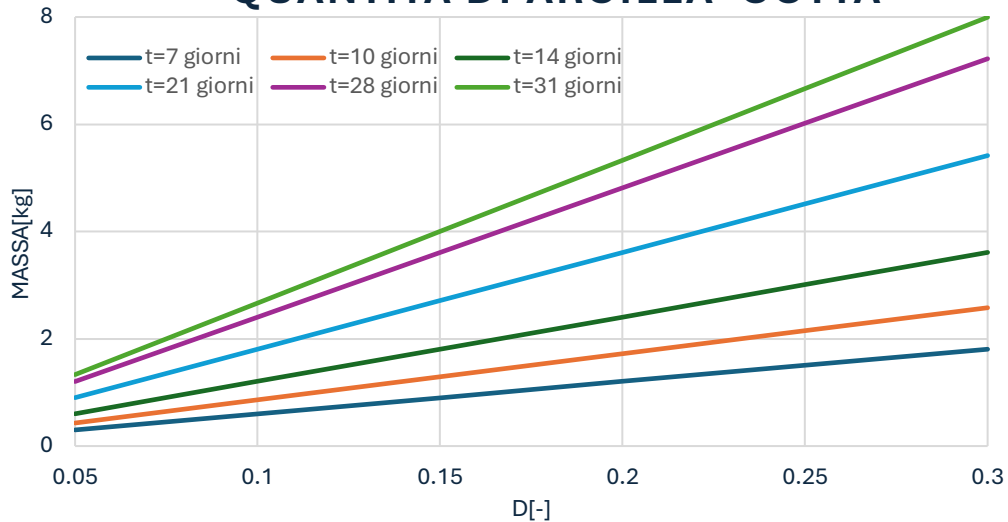


Figura 67-andamento quantità di argilla cotta richiesto per le diverse condizioni di D e di t per N=0.5 1/day

### QUANTITÀ DI SILICA GEL

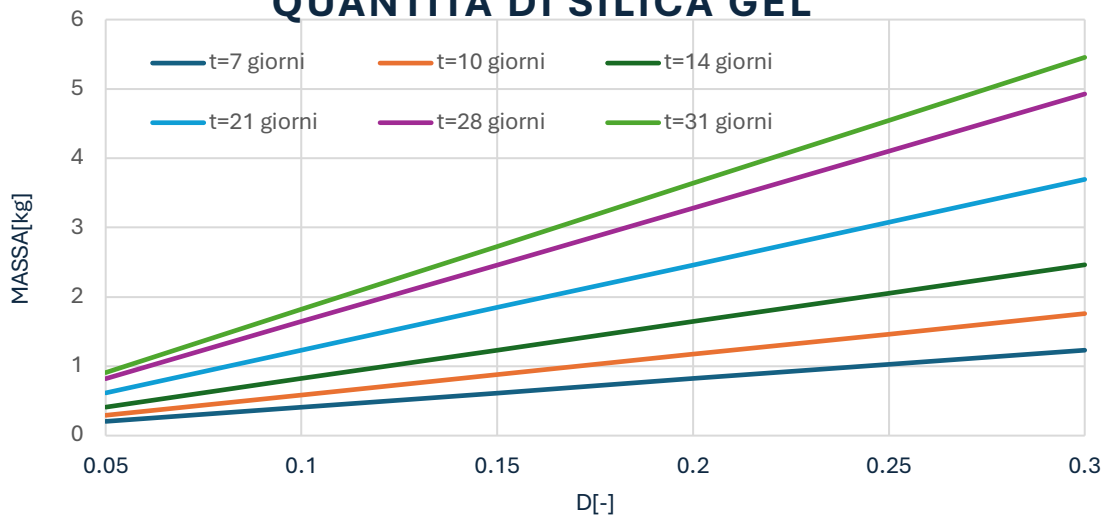


Figura 68-andamento quantità di silica gel richiesto per le diverse condizioni di D e di t per N=0.5 1/day

Come visibile nei grafici precedenti, si può notare come, con un tasso di ricambi orari sufficientemente basso, ottenere un controllo passivo dell'umidità relativa anche per un numero di giorni considerevole richiede una quantità di materiale tampone ragionevole. Proprio per questo motivo, avere un controllo passivo dell'umidità rappresenta un modo efficiente, non molto costoso e molto semplice per mantenere l'umidità relativa in range che possano favorire la conservazione dei reperti custoditi nelle teche.

### 5.3 Test del 13/01/2026

Una volta preparati definitivamente i pannelli, si è deciso di testare il loro comportamento in un test all'interno della teca per visualizzare come questi due pannelli possano realmente influenzare il microclima della vetrina. Le condizioni del test sono le seguenti:

Tabella 10- condizioni del test del 13/01/2026

<b>Inizio test</b>	13/01/26 alle 19:55
<b>Fine test</b>	18/01/26 alle 20:40
<b>Temperatura [°C]</b>	23
<b>UR_min[%]</b>	16h al 33%
<b>UR_max[%]</b>	8h al 70%

Partendo da queste condizioni, si possono analizzare i seguenti risultati:

### ANDAMENTO T E UR TESTO 3\_ESTERNO

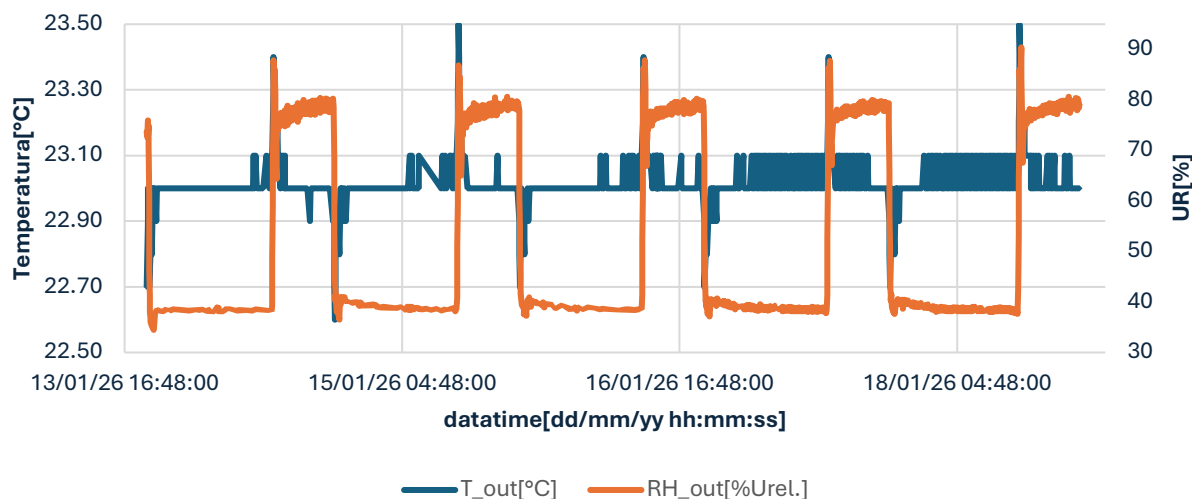


Figura 69-andamento di temperatura e umidità relativa esterna

## ANDAMENTO T E UR TESTO 4(INTERNO)

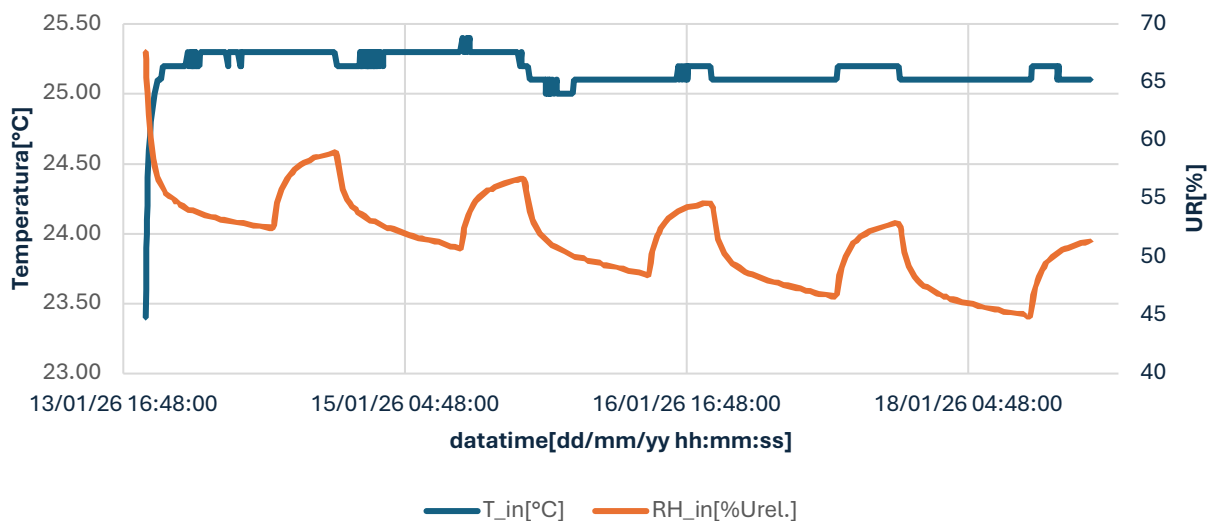


Figura 70-andamento di temperatura e umidità relativa interna

## ANDAMENTO MASSA PANNELLO

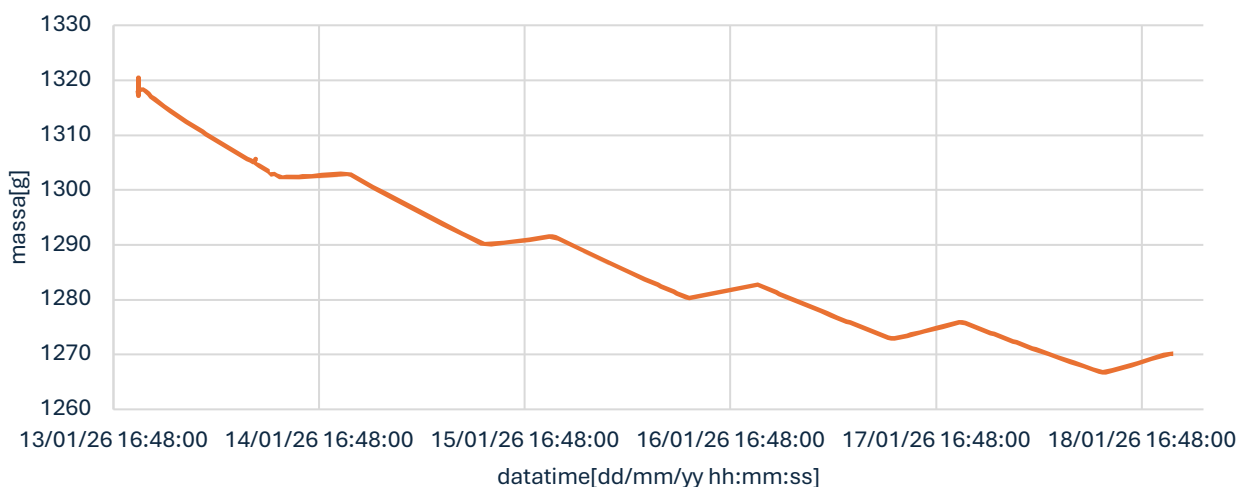


Figura 71-andamento della massa del pannello durante il test

Come si evince da questi risultati, l'umidità relativa rimane sempre nei range prefissati. Questo porta a concludere che il test sia andato a buon fine. Ciò nonostante, come si evince sia dall'andamento di umidità relativa che da quello della massa, il materiale tampone non sembra poter garantire il mantenimento dell'umidità target ulteriormente. In ogni caso, si può concludere che i pannelli di materiale tampone inseriti nella teca abbiano aiutato a mantenere il microclima interno nelle condizioni desiderate.

## 5.4 Test del 17/02 e del 18/02/26

Come ultimo test per il controllo passivo dell'umidità all'interno delle teche museali è stato confrontato il comportamento del pannello stampato in laboratorio con l'Artsorb, un materiale commerciale e utilizzato propriamente per il controllo dell'umidità all'interno delle teche. Per questo test, effettuato in due giorni diversi per Artsorb e per il pannello, è stato previsto un andamento sinusoidale dell'umidità relativa e temperatura costante. A rendere più significativo il test è stato anche migliorato l'isolamento all'aria della teca ed effettuato, contemporaneamente al test di controllo passivo, una prova di decadimento così da valutare il nuovo tasso di ricambi d'aria.

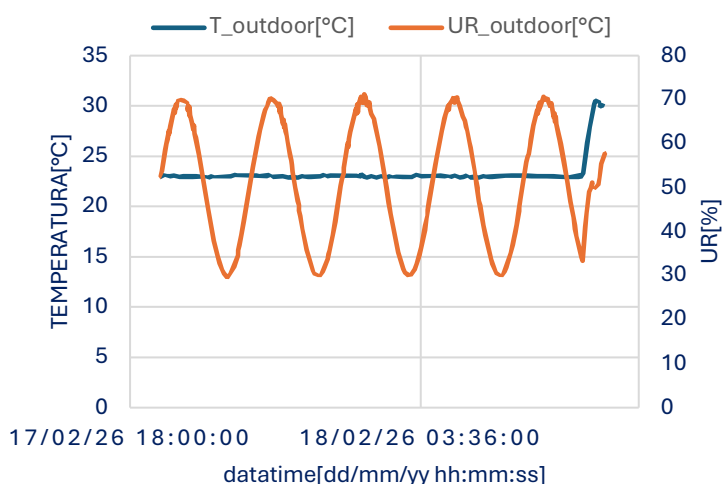
Le condizioni del test sono riportate nella tabella seguente.

Tabella 11- condizioni del test

	ARTSORB	PANNELLO
Inizio test	17/02/2026 alle 19	18/02/2026 alle 16.30
Fine test	18/02/2026 alle 9.15	19/02/2026 alle 8:55
Massa inserita[g]	1029.59	1254.59
T iniziale[°C]	23	23
UR iniziale [%]	50	50
UR massima [%]	70	70
UR minima [%]	30	30
Periodo [h]	3	3

Di seguito verrà mostrato anche l'andamento di temperatura e umidità relativa della BET per i due giorni.

### ANDAMENTO T E UR BET 17/02



### ANDAMENTO DI T E UR BET 18/02

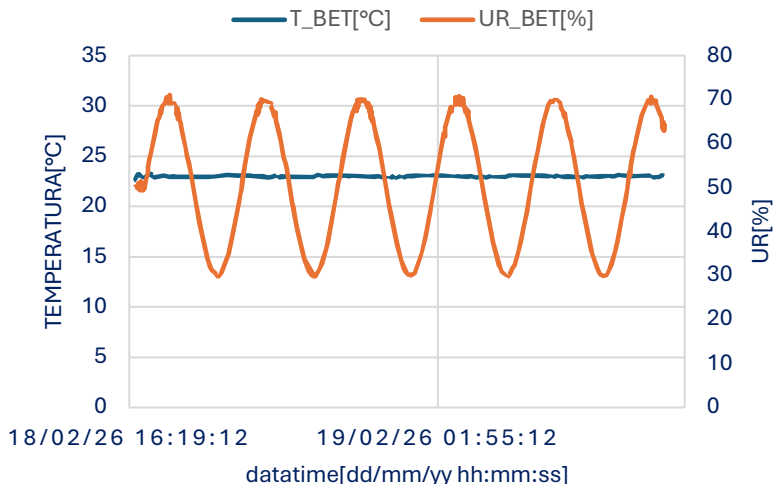


Figura 72- andamento delle condizioni esterne nei due giorni di test

Di seguito una foto della teca nelle nuove condizioni di isolamento e preparata per il test.

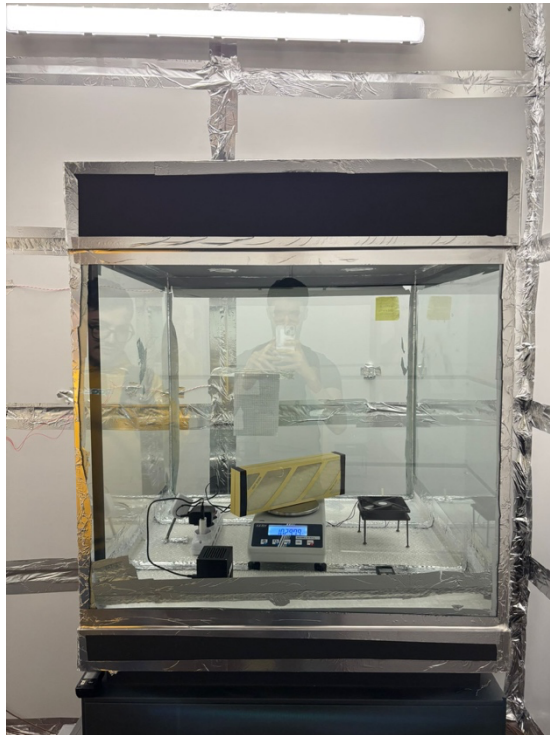


Figura 73- teca preparata per l'ultimo test

Una volta ultimati i preparativi per l'ultimo test è stato possibile estrapolare i risultati visibili nel prossimo paragrafo.

#### 5.4.1 Risultati prove di decadimento

Come primo obiettivo, si è voluto stabilire quale fosse il nuovo tasso di ricambi d'aria della teca, valutandola per entrambi i test in maniera analoga, effettuando lo stesso test illustrato nel capitolo 3.2. I risultati sono stati ottenuti partendo dai seguenti andamenti di concentrazione di SF<sub>6</sub> alla teca.

### ANDAMENTO DELLA CONCENTRAZIONE INTERNA ALLA TECA TEST 17/02

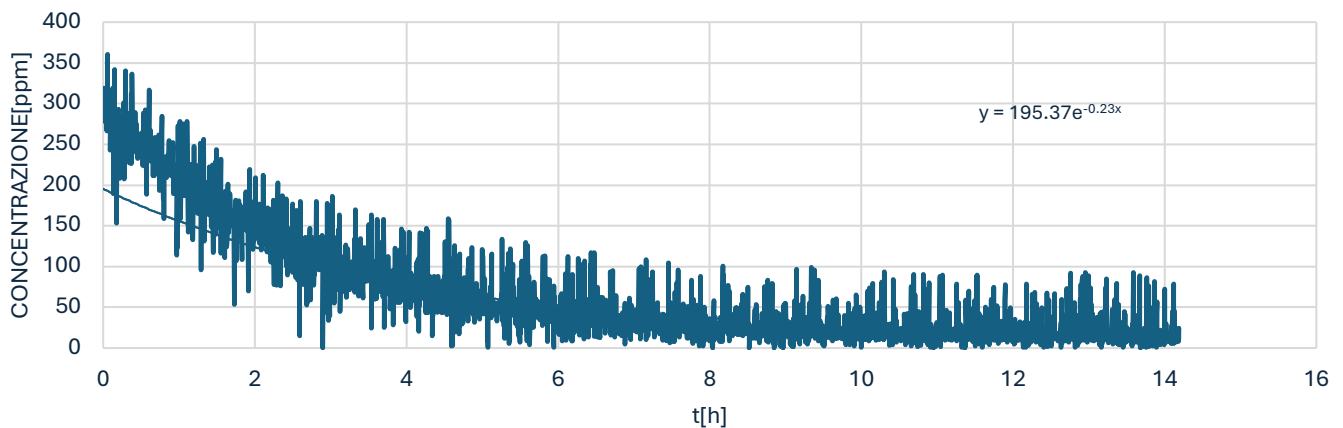


Figura 74-andamento concentrazione SF<sub>6</sub> interno alla teca test 17/02

## ANDAMENTO CONCENTRAZIONE INTERNA ALLA TECA 18/02

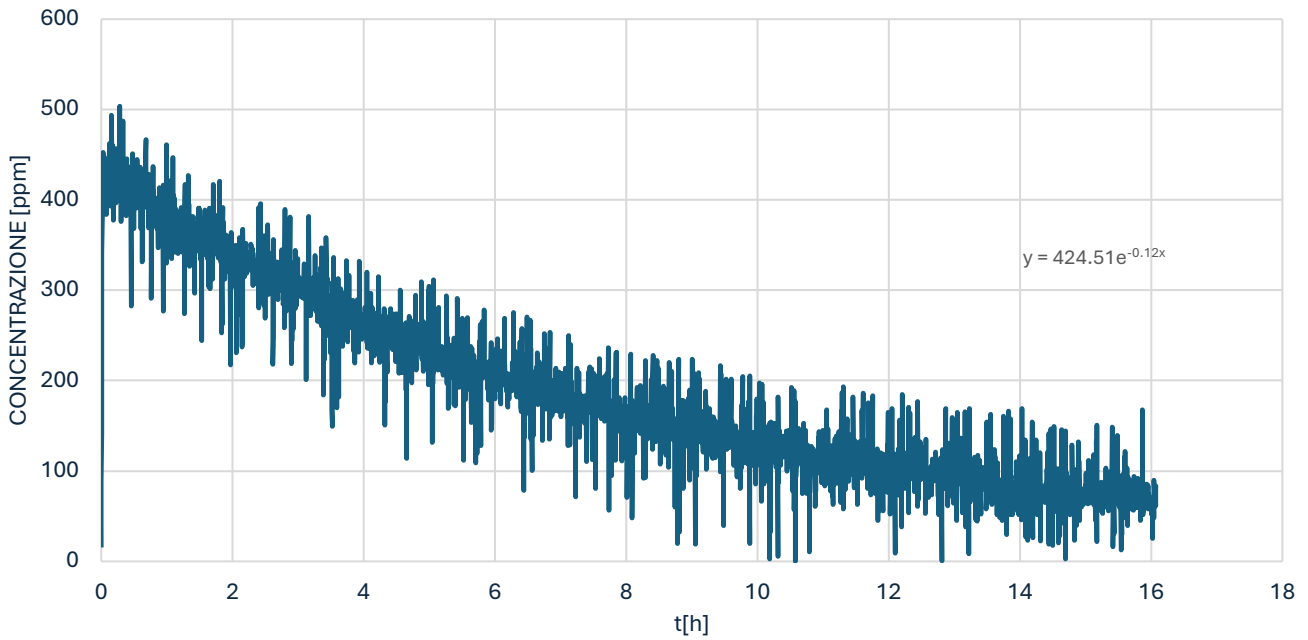


Figura 75-andamento concentrazione SF6 interna alla teca test 18/02

Da questi andamenti e dall'equazione di best fit dei dati si ottengono i seguenti valori di tasso di ricambi d'aria:

Tabella 12-tasso di ricambi d'aria ottenuti dai due test

	test del 17/02	Test del 18/02
ACH[1/h]	0.23	0.12

Come si evince dalla Tabella 12, dunque, il tasso di ricambi d'aria è migliorato notevolmente in entrambi i casi.

### 5.4.2 Risultati test di controllo passivo dell'umidità relativa

Per quanto riguarda, invece, il controllo passivo dell'umidità relativa, sono stati ottenuti i seguenti risultati visibili nei seguenti grafici.

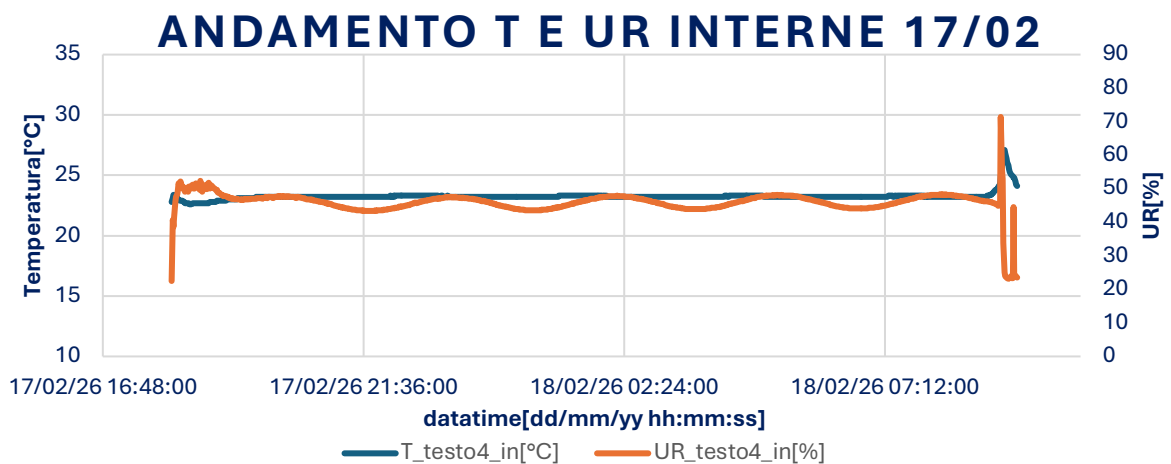


Figura 76- andamento di temperatura e umidità relativa interne alla teca test 17/02

## ANDAMENTO T E UR INTERNE

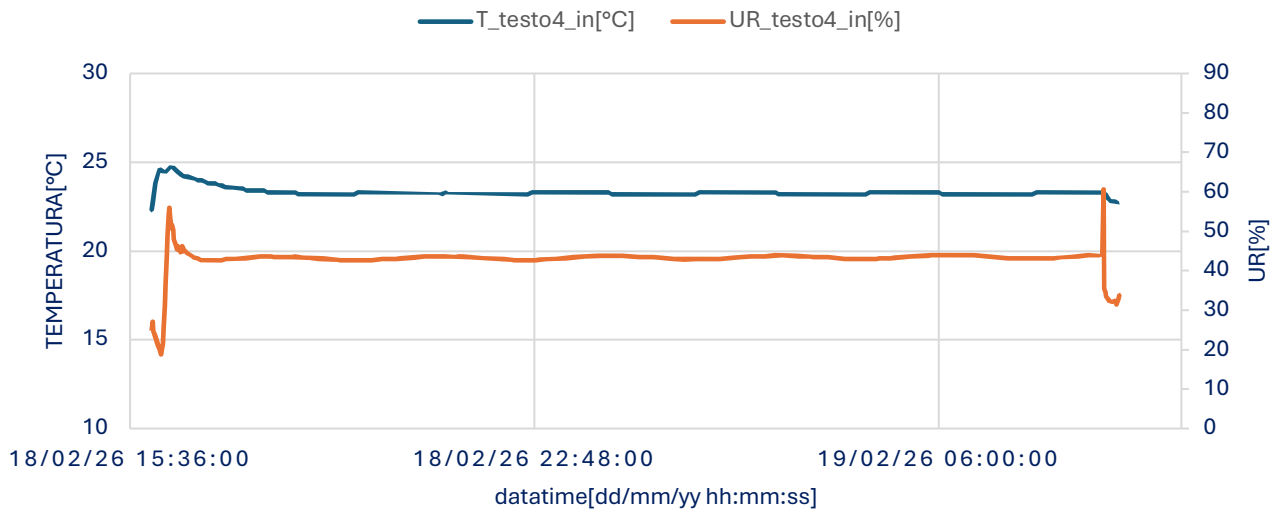


Figura 77- andamento di temperatura e umidità relativa interne test 18/02

Oltre agli andamenti di temperatura e umidità relativa, è opportuno visualizzare l'andamento della massa durante la durata del test.

Di seguito verranno riportati gli andamenti della massa dell'artsorb e del pannello durante il test.

## ANDAMENTO MASSA ARTSORB E VARIAZIONE DELLA MASSA

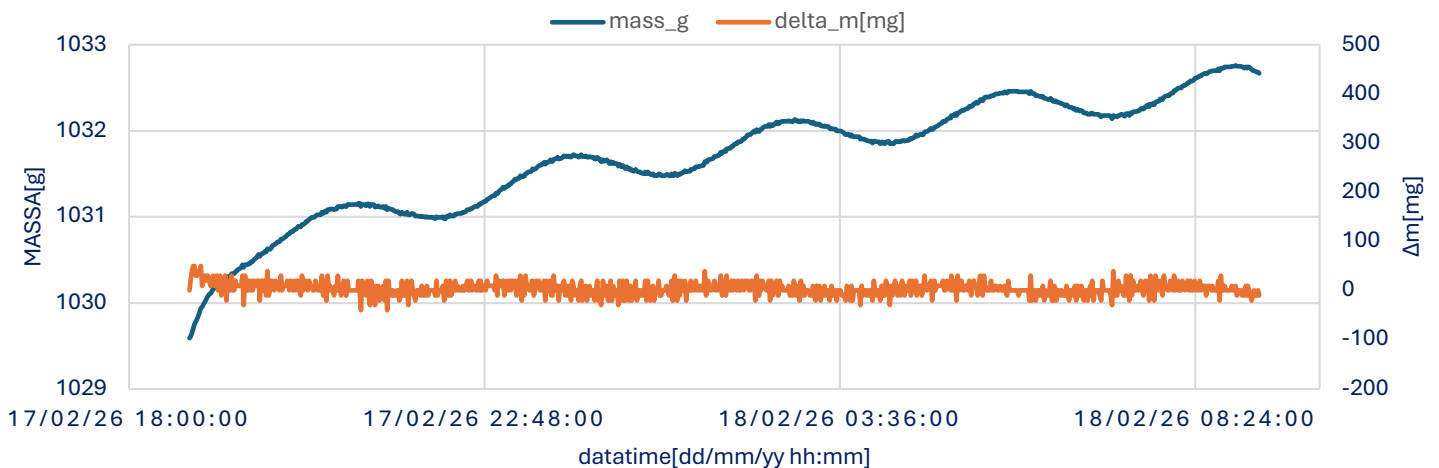


Figura 78-andamento della massa e della variazione di massa di Artsorb durante il test

Come si evince dunque, la massa dell'Artsorb tendenzialmente cresce ma in maniera molto contenuta durante il test. Di fatto la variazione di massa è sempre molto contenuta e prossima allo zero.

Passando poi agli andamenti di massa del pannello si osserva:

## ANDAMENTO DI MASSA E VARIAZIONE DELLA MASSA DEL PANNELLO

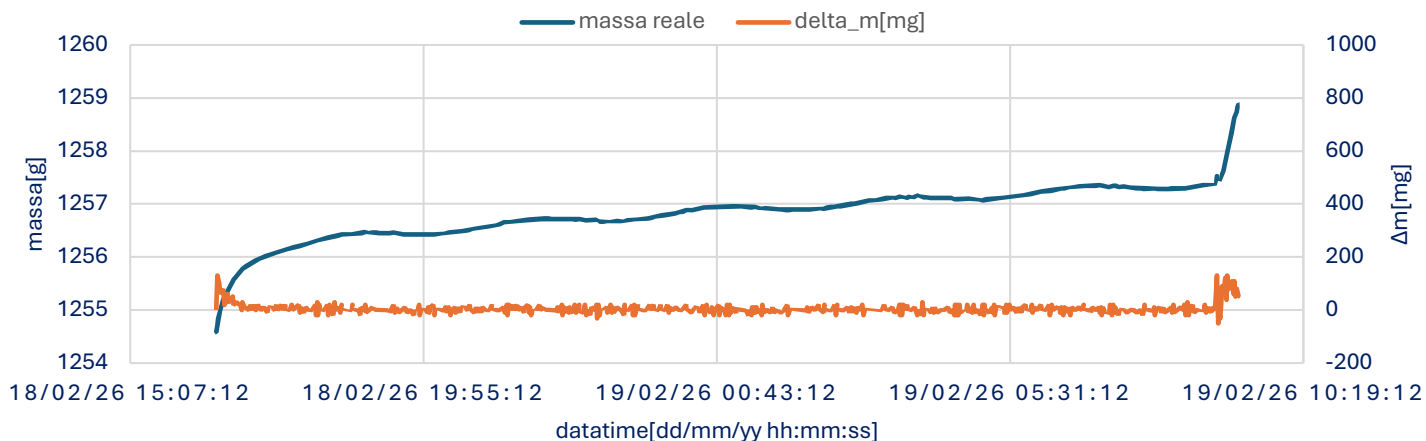


Figura 79- andamento di massa e variazione della massa del pannello durante il test

La tendenza rispecchia abbastanza similmente ciò che è avvenuto con l'Artsorb, per cui valgono le stesse considerazioni fatte in precedenza.

Per concludere la descrizione di questo test, infine, vengono riportate le seguenti due tabelle per trarre ulteriori considerazioni.

Tabella 13-Resoconto risultati caratteristiche termo-igrometriche interne per Artsorb e pannello

	ARTSORB			PANNELLO		
	BET	INT.	EST.	BET	INT.	EST.
T_media[°C]	23.13	23.21	22.98	23.00	23.29	23.03
T_max[°C]	23.86	23.30	24.60	23.27	24.30	23.30
T_min[°C]	22.82	22.90	22.90	22.60	23.20	22.90
ΔT_max[°C]	1.04	0.40	1.70	0.67	1.10	0.40
UR_media[%]	51.06	46.01	57.17	50.51	43.33	56.65
UR_max[%]	71.20	48.30	81.60	71.04	46.20	80.50
UR_min[%]	29.58	43.30	25.30	29.62	42.40	22.10
ΔUR_max[%]	41.62	5.00	56.30	41.41	3.80	58.40

Tabella 14- resoconto risultati masse di Artsorb e pannello

	ARTSORB		PANNELLO	
	massa[g]	$\Delta m$ [mg]	massa[g]	$\Delta m$ [mg]
media	1031.69	3.55	1256.83	4.28
max	1032.76	50	1258.88	130
min	1029.59	-40	1254.58	-50

Analizzando i dati riportati nelle tabelle, si osserva che le condizioni interne alla teca non corrispondono pienamente alle aspettative, in quanto l'umidità interna non si mantiene costantemente nel range del  $50 \pm 5\%$ , bensì si stabilizza nell'intervallo  $45 \pm 5\%$ . Tale discrepanza suggerisce la presenza di problematiche legate al pre-condizionamento dei due materiali. Per quanto concerne la variazione di massa, come evidenziato in tabella, questa risulta essere dell'ordine dei milligrammi, indicando una massa pressoché costante per entrambi i materiali tampone durante l'intero periodo di test.

## 6. Controllo attivo: caso studio

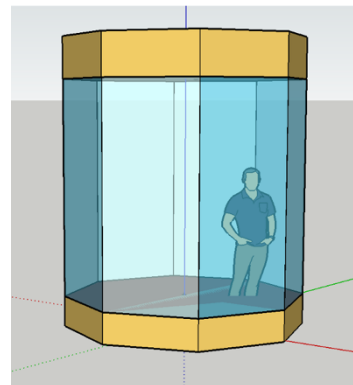
Il presente capitolo si propone di analizzare l'applicazione del controllo attivo alle teche museali. L'analisi si focalizzerà sulla simulazione del comportamento di tre vetrine, con particolare attenzione al calcolo della potenza di progetto necessaria al mantenimento delle condizioni interne desiderate. A tal fine, è stato impiegato il software OpenStudio. Le teche museali considerate in questo studio sono:

- Teca del Politecnico per esposizioni temporanee
- Teca di Alien del museo del cinema
- Teca di Gremlins del museo del cinema

Al fine di avviare questa analisi, si è proceduto alla costruzione dei modelli delle due teche del museo del cinema, mentre il modello relativo alla teca del Politecnico è stato già oggetto di approfondimento nel capitolo 3.

### 6.1 Costruzione dei modelli

Per cominciare, è stata necessaria la modellazione 3D delle geometrie delle due teche su SketchUp, proprio come la teca del laboratorio.



*Figura 80-teca Aliens reale e modellata su SketchUp*

La stessa cosa è stata fatta per la teca di gremlins.

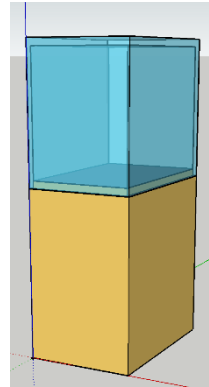


Figura 81-teche di Gremlins reale e modellata

Le teche in questione presentano le seguenti caratteristiche geometriche:

Tabella 15-caratteristiche geometriche delle vetrine di Aliens e Gremlins

caratteristiche geometriche	Aliens	Gremlins
Area di base[m <sup>2</sup> ]	4.74	0.53
Altezza [m]	3.1	1.88
Superficie vetrata[m <sup>2</sup> ]	19	3.04
ACD[1/day]	1	1
Trasmittanza termica del vetro[W/m <sup>2</sup> K]	5.7	5.7

### 6.1.1 Definizione dei carichi termici delle teche

Per quanto riguarda i carichi, soprattutto d'illuminazione, sono stimati in quanto, a differenza della teca del Politecnico, non è stato possibile misurarli direttamente. Nella seguente tabella sono riportati le schedules e i carichi impostati nella simulazione per la simulazione.

Tabella 16-schedules e carichi per le vetrine di alien e gremlins

	Schedules	
	alien	Gremlins
Ore operative impianto	0-24	0-24
Ore illuminazione	0-24	0-24

ACH[1/h]	0.042	0.042
<b>Carichi</b>		
Illuminazione teca[W]	80	10
Illuminazione stanza[W]	150	50

Il carico di ventilazione è stato stimato, in assenza di un tasso di ricambi d'aria noto e misurabile direttamente, come nel caso della teca del Politecnico, a un ricambio giornaliero. Tale valore risulta realistico per una teca ad alte prestazioni.

A partire da questi dati di base, è necessario definire le condizioni climatiche esterne per la realizzazione della simulazione e l'analisi dei risultati. In tale contesto, disponendo degli andamenti di temperatura interni al museo del cinema, è possibile effettuare una simulazione basata su sollecitazioni reali, consentendo così il dimensionamento della potenza di progetto.

I dati climatici, forniti dal museo del cinema, comprendono i valori di temperatura e umidità relativa interne nel periodo compreso tra il 1° luglio 2024 e il 31 agosto 2024. L'andamento di tali parametri è il seguente.

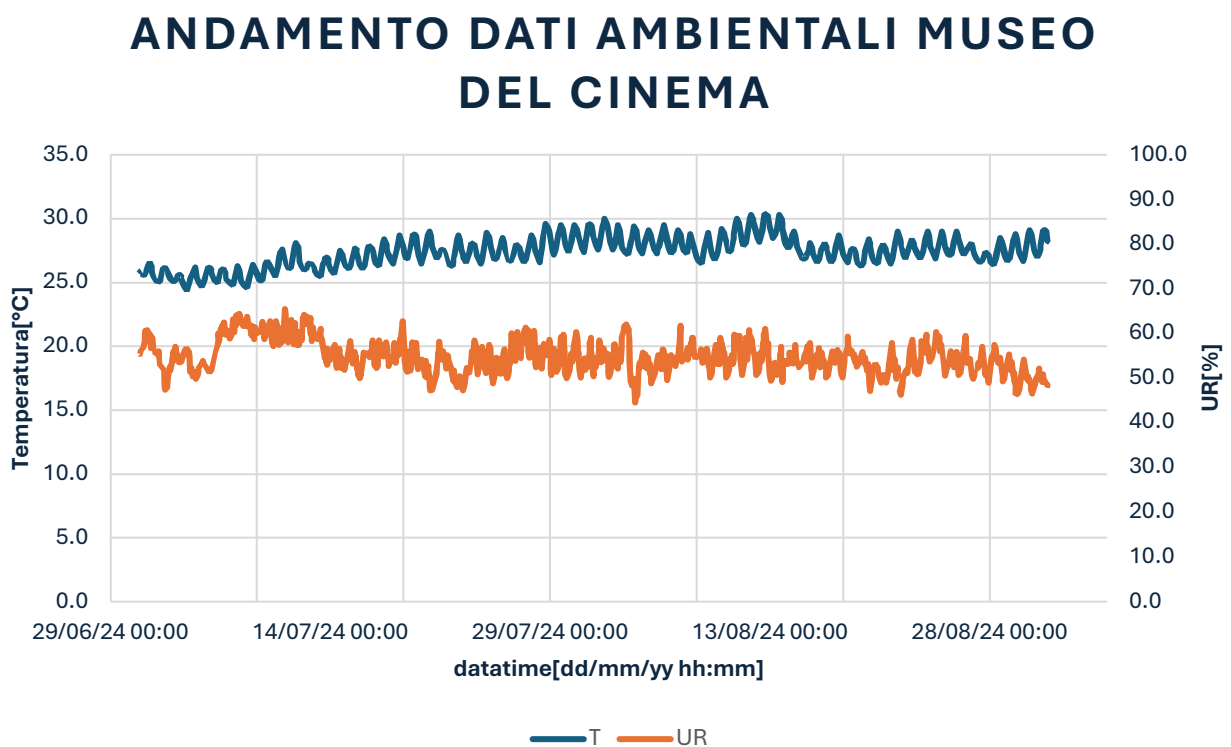


Figura 82-andamento di temperatura e umidità relativa interni al museo del cinema

Una volta definiti anche i dati climatici esterni alle teche, bisogna definire quelli che sono i set-point di temperatura e umidità relativa desiderati. Considerato che il modello in questione non è stato progettato per reperti specifici, si è optato per il raggiungimento di condizioni standardizzate.:

- $T_{\max} = 23.5^{\circ}\text{C}$
- $T_{\min} = 22.5^{\circ}\text{C}$
- $UR_{\max} = 55\%$
- $UR_{\min} = 45\%$

Avendo la possibilità di controllare attivamente la teca permette di avere bande di temperatura e umidità più strette, avendo per l'appunto un controllo attivo per la regolazione di temperatura.

## 6.2 Risultati simulazione

Come detto in precedenza, l'obiettivo è stato di calcolare la potenza di raffreddamento necessaria al mantenimento delle condizioni di temperatura e umidità relativa per le tre teche.

Il focus, dunque, diventa quello di trovare la potenza frigorifera e verificare se le condizioni interne si trovano per tutta la durata della simulazione all'interno delle condizioni di set-point.

Di seguito una tabella di riepilogo dei risultati della simulazione.

*Tabella 17- riepilogo dei risultati ottenuti dalla simulazione*

		media	max	min
alien	carico frigorifero[W]	145.49	220.19	85.03
	UR[%]	45.00	45.00	45.00
	T[°C]	23.39	23.50	22.51
	T_est[°C]	27.38	30.53	24.40
	UR_est[%]	54.56	65.55	45.03
gremlins	carico frigorifero[W]	38.05	54.78	24.66
	UR[%]	45.01	45.42	45.00
	T[°C]	23.50	23.50	23.50
	T_est[°C]	27.38	30.54	24.40
	UR_est[%]	54.56	65.55	45.03
teca laboratorio	carico frigorifero[W]	33.66	51.82	16.19
	UR[%]	45.00	45.00	45.00

	T[°C]	23.50	23.50	23.50
	T_est[°C]	27.38	30.54	24.40
	UR_est[%]	54.56	65.55	45.03

Come si evince dalla tabella 13 si può riscontrare di come i risultati siano assolutamente positivi e che il controllo attivo garantisca al meglio il mantenimento delle condizioni termo-igrometriche del microclima della teca. Volendo poi, per una migliore comprensione dei risultati della simulazione, si possono osservare gli andamenti del carico frigorifero e delle condizioni interne alla teca:

### CARICO FRIGORIFERO ALIEN

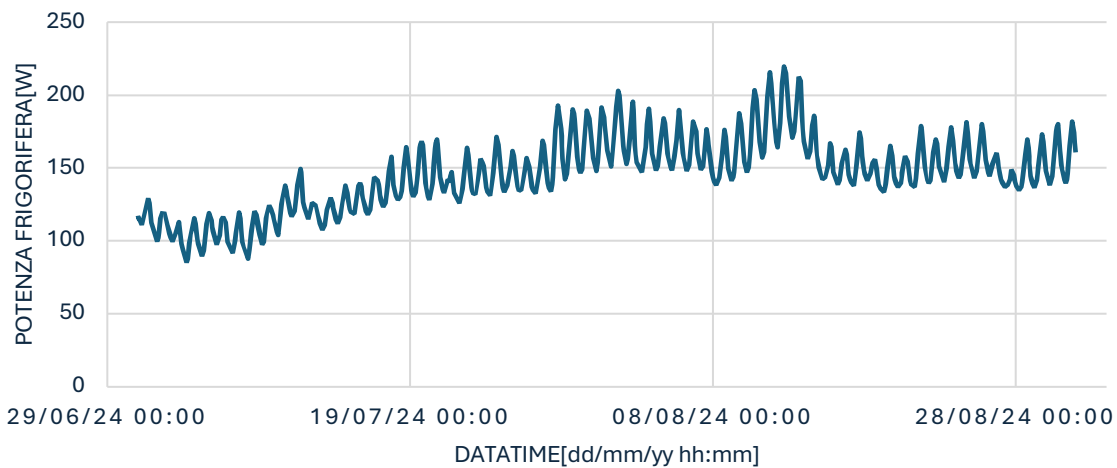


Figura 84-andamento carico frigorifero Alien per il periodo di simulazione

### CONFRONTO TRA CONDIZIONI INTERNE ED ESTERNE ALIEN

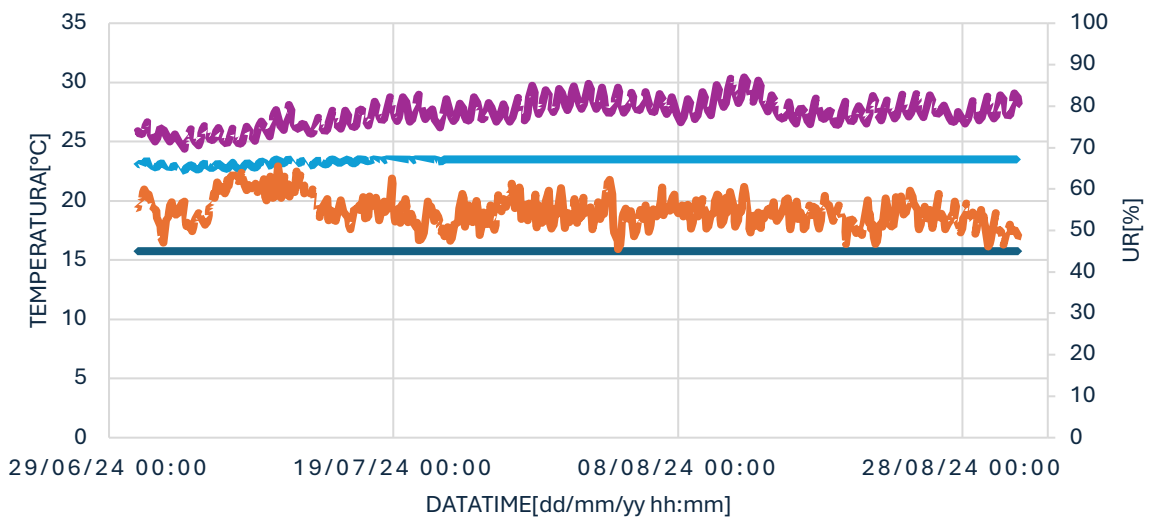


Figura 83-confronto tra condizioni interne ed esterne Alien

## CARICO FRIGORIFERO GREMLINS

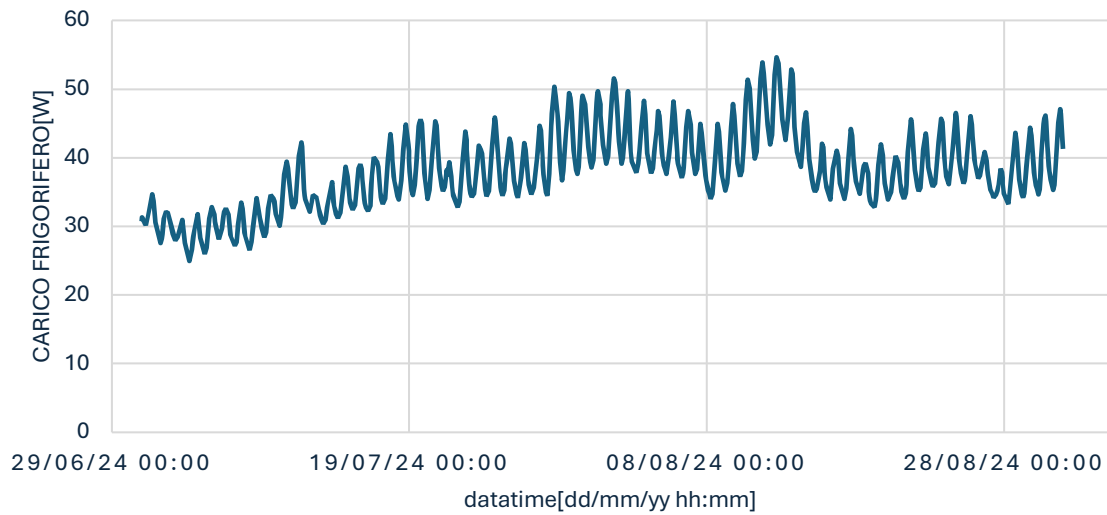


Figura 87-andamento carico frigorifero Gremlins

## CONFRONTO TRA CONDIZIONI INTERNE ED ESTERNE GREMLINS

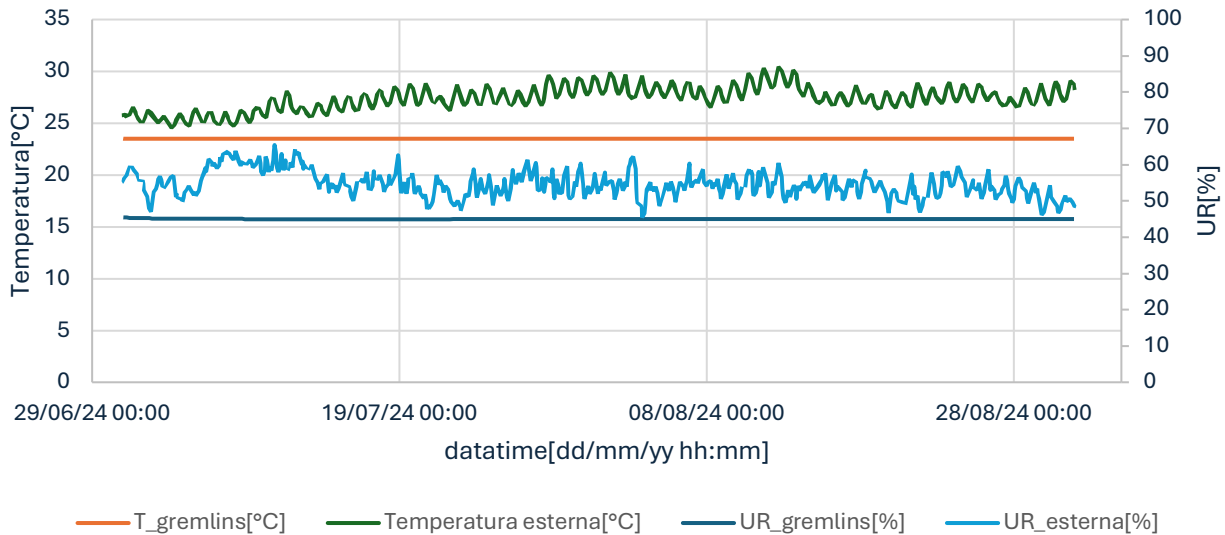


Figura 86-andamento condizioni interne ed esterne Gremlins

## CARICO FRIGORIFERO TECA LABORATORIO

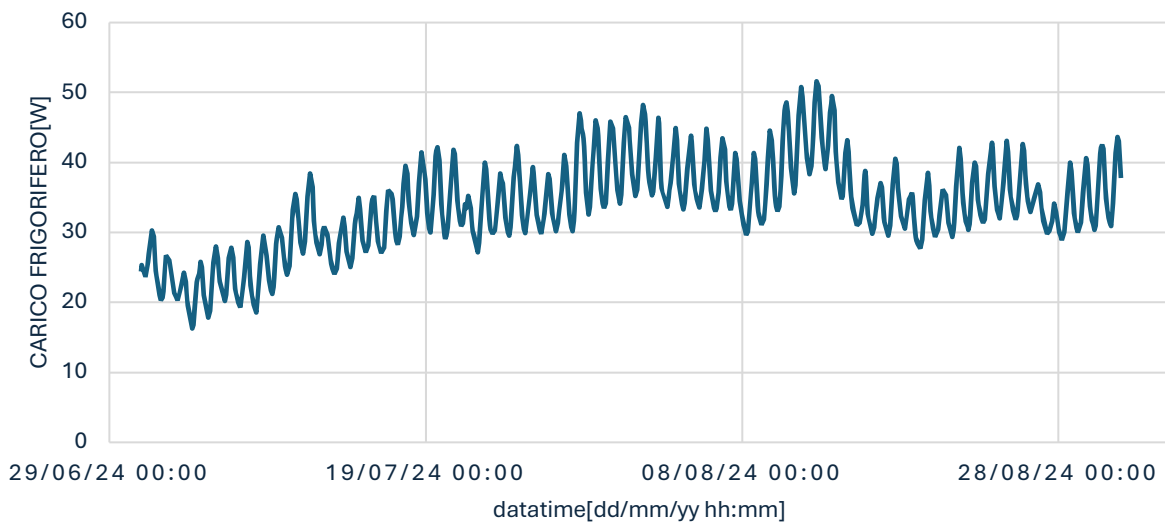


Figura 85-andamento carico frigorifero teca del laboratorio

## CONFRONTO TRA CONDIZIONI INTERNE ED ESTERNE TECA LABORATORIO

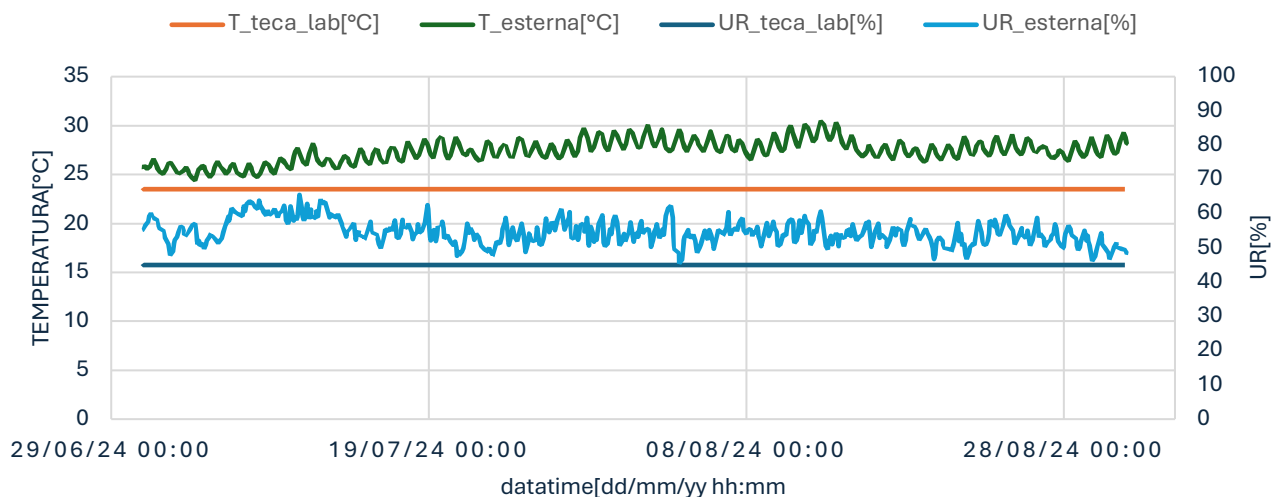


Figura 88-confronto tra condizioni interne ed esterne teca del laboratorio

Come illustrato nelle figure grafiche precedenti, emerge chiaramente un significativo disaccoppiamento tra le condizioni interne ed esterne, ottenuto mediante potenze frigorifere contenute. Ciò consente di affermare, in linea con quanto già evidenziato nel capitolo 2, che la climatizzazione attiva delle teche museali rappresenta una soluzione concreta e vantaggiosa sotto ogni aspetto.

## 7. Conclusioni

Il presente lavoro di tesi ha consentito un'approfondita analisi delle dinamiche del controllo microclimatico applicato alle teche museali, integrando l'analisi teorica delle leggi fisiche con un rigoroso percorso sperimentale e di modellazione. L'obiettivo primario, ovvero la garanzia di condizioni termo-igrometriche ottimali per la conservazione dei beni culturali congiunta a una maggiore efficienza energetica, è stato perseguito attraverso diverse fasi metodologiche che hanno condotto a risultati di rilievo:

- **Validazione e Affidabilità del Modello Numerico:** Lo sviluppo del modello tridimensionale mediante SketchUp e OpenStudio ha costituito un elemento fondamentale del lavoro. La fase di calibrazione, basata su prove di tenuta con gas traccianti (SF<sub>6</sub> e CO<sub>2</sub>) e campagne di misura in camera climatica, ha dimostrato un'elevata precisione dello strumento numerico. Gli scostamenti minimi tra i dati simulati e quelli misurati confermano che la modellazione agli elementi finiti è in grado di prevedere con accuratezza il comportamento della teca, rendendola uno strumento di progettazione indispensabile per valutare l'impatto di carichi termici e infiltrazioni d'aria.
- **Innovazione nel Controllo Passivo (Materiali Tampone):** La ricerca ha portato alla creazione e caratterizzazione di un nuovo materiale igroscopico a base di bentonite e alginato di calcio. I test di adsorbimento hanno evidenziato come l'aggiunta di alginato migliori significativamente la capacità del composto di modulare le fluttuazioni di umidità relativa. L'efficacia di questi pannelli è stata verificata sperimentalmente: inseriti nella teca sottoposta a stress climatico, hanno mantenuto l'umidità interna entro i range di sicurezza prefissati (50±5%), confermando come un adeguato buffering passivo possa stabilizzare il microclima anche in presenza di un macroambiente critico.
- **Dimensionamento e Controllo Attivo:** L'estensione dell'analisi a casi studio reali, quali le teche "Alien" e "Gremlins" del Museo del Cinema, ha evidenziato le potenzialità della climatizzazione attiva dedicata. Le simulazioni hanno dimostrato la possibilità di ottenere un disaccoppiamento totale tra le condizioni ambientali del museo e l'interno della teca mediante l'impiego di potenze frigorifere estremamente contenute. Tale risultato riveste particolare importanza in quanto conferma la maggiore efficienza energetica della climatizzazione dei singoli volumi espositivi rispetto al condizionamento dell'intera sala museale.

- Sinergia tra Strategie: In definitiva, emerge che la soluzione ottimale non risiede nell'adozione di una singola tecnologia, bensì nell'integrazione sinergica di diverse strategie, quali un elevato controllo di frontiera (teche a bassa permeabilità), l'utilizzo di materiali tampone per l'inerzia igroscopica e sistemi attivi per la regolazione precisa di temperatura e umidità.

In conclusione, questo studio fornisce una metodologia rigorosa per la progettazione di sistemi di conservazione avanzati, dimostrando che l'impiego combinato di materiali igroscopici innovativi e sistemi di controllo attivo dimensionati correttamente rappresenta la via maestra per coniugare la tutela del patrimonio artistico con le moderne esigenze di risparmio energetico.

## Bibliografia

1. Tétreault, J. (2018). \*The Evolution of Specifications for Limiting Pollutants in Museums and Archives\*. Journal of the Canadian Association for Conservation, 43, 21-37.[1]
2. Schieweck, A. (2020). \*Adsorbent media for the sustainable removal of organic air pollutants from museum display cases\*. Heritage Science, 8(1), 12.[2]
3. Dupré, J.-C. et al. (2020). \*Experimental study of the hygromechanical behaviour of a historic painting on wooden panel\*. Journal of Cultural Heritage, 46, 165-175.[3]
4. Uzielli, L. et al. (2022). \*A method to assess the hygro-mechanical behaviour of original panel paintings... Mona Lisa\*. Journal of Cultural Heritage, 58, 146-155.[4]
5. Perino, M. (2018). \*A methodology for the assessment of the performance and the commissioning of museum showcases\*. Journal of Cultural Heritage, 34, 277-290.[5]
6. Buonomano, A. et al. (2017). \*Temperature and humidity adaptive control in multi-enclosed thermal zones\*. Energy and Buildings, 135, 263-285.[6]
7. Ascione, F. et al. (2009). \*Energy saving strategies in air-conditioning for museums\*. Applied Thermal Engineering, 29(4), 676-686.[7]
8. Thickett, D. et al. (2007). \*The effect of air tightness on RH buffering and control\*. Museum Microclimates, 245-251.[8]
9. Romano, F. et al. (2015). \*Passive control of microclimate in museum display cases\*. Journal of Cultural Heritage, 16(4), 413-418.[9]
10. Thickett, D. (s.d.). \*Lumped parameter model for passive microclimate control in museum display cases\*. [10]
11. Tétreault, J. (2017). \*Products Used in Preventive Conservation\*. CCI Technical Bulletin 32.[11]
12. ASTM International. (2016). \*Standard Test Method for Hygroscopic Sorption Isotherms of Building Materials\* (C1498-04a).[12]
13. Tétreault, J. (2021). \*Control of Pollutants in Museums and Archives\*. CCI Technical Bulletin 37.[13]

14. Tétreault, J., Bégin, P. (2018). \*Silica Gel: Passive Control of Relative Humidity\*. CCI Technical Bulletin 33.[14]
15. Thickett, D. et al. (2007). \*The effect of air tightness on RH buffering and control\*. Museum Microclimates.[15]
16. Huang, Y. et al. (2022). \*Performance exploration on a small sorption device extracting water from air for museum display cases\*. Sustainable Cities and Society, 78, 103666.[16]
17. Ferreira, C. et al. (2015). \*Influence of Hygroscopic Materials in the Stabilization of Relative Humidity Inside Museum Display Cases\*. Energy Procedia, 78, 1275-1280.[17]
18. Schieweck, A., Salthammer, T. (2011). \*Indoor air quality in passive-type museum showcases\*. Journal of Cultural Heritage, 12(2), 205-213.[18]
19. van Schijndel, A.W.M. et al. (2008). \*Application of an integrated indoor climate, HVAC and showcase model for the indoor climate performance of a museum\*. Energy and Buildings, 40(4), 647-653.[19]
20. UNI 16104-61. \*Linee guida per vetrine museali\* (EN version).[20]
21. Groupe Bizot. (2023). \*The Bizot Green Protocol: Latest refresh September 2023\*.[21]
22. CEN EN 15999. \*Conservation of cultural heritage - Guidelines for design of showcases\*.[22]
23. Ministero per i Beni Culturali. (2001). \*D.M. 10 maggio 2001: Atto di indirizzo sui criteri tecnico-scientifici e standard per musei\*.[23]
24. UNI 15757. \*Conservazione dei Beni Culturali - Esigenze microclimatiche di esposizione\*.[24]
25. UNI 10829. \*Conservazione dei Beni Culturali - Beni cartacei - Conservazione in sede\*.[25]
26. Goli, G., Cocchi, L., Togni, M., & Fioravanti, M. (2017). Test of a device for the active control of environmental humidity in museum display cases. International Journal of Conservation Science, 8(1), 43–50.[26]
27. Pandey, S. (2017). A comprehensive review on recent developments in bentonite-based materials used as adsorbents for wastewater treatment. In Journal of Molecular Liquids (Vol. 241, pp. 1091-1113. [27]

28. Gentile V., Libralato M., Fantucci S., Shtrepi L., & Autretto G. (2023). Enhancement of the hygroscopic and acoustic properties of indoor plasters with a Super Adsorbent Calcium Alginate BioPolymer. *Journal of Building Engineer*, 76. [28]